

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2003年2月6日 (06.02.2003)

PCT

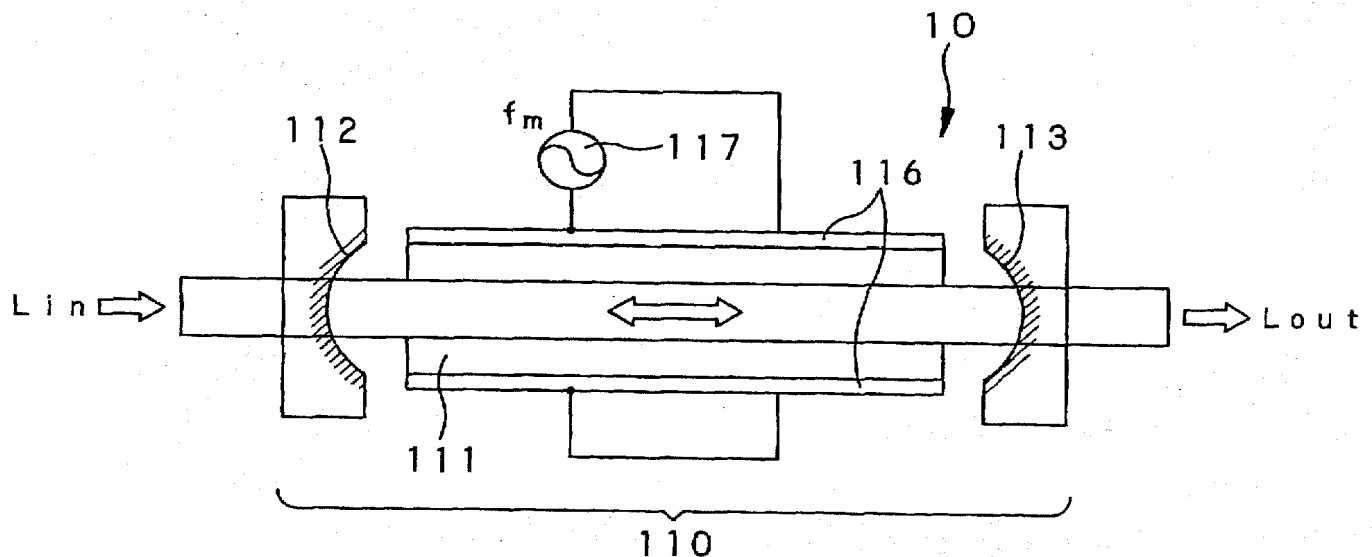
(10) 国際公開番号
WO 03/010596 A1

- (51) 国際特許分類⁷: G02F 2/02 特願2002-38839 2002年2月15日 (15.02.2002) JP
特願2002-97167 2002年3月29日 (29.03.2002) JP
- (21) 国際出願番号: PCT/JP02/07637
- (22) 国際出願日: 2002年7月26日 (26.07.2002)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2001-226588 2001年7月26日 (26.07.2001) JP
特願2001-226591 2001年7月26日 (26.07.2001) JP
特願2001-334299 2001年10月31日 (31.10.2001) JP
特願2001-354947 2001年11月20日 (20.11.2001) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 科学技術振興事業団 (JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY CORPORATION) [JP/JP]; 〒332-0012 埼玉県 川口市 本町4丁目1番8号 Saitama (JP).
- (72) 発明者: 興梠 元伸 (KOUROGI, Motonobu) [JP/JP]; 〒241-0801 神奈川県 横浜市 旭区若葉台4-2 8-9 0 5 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): バンバン ウィディヤトモコ (BAMBANG, Widiyatmoko) [ID/JP]; 〒226-0026 神奈川県 横浜市 緑区長津田町3 0 3 4-3 Kanagawa (JP). 仲本 修 (NAKAMOTO, Osamu) [JP/JP];

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FREQUENCY COM GENERATOR

(54) 発明の名称: 光周波数コム発生器



(57) Abstract: An optical frequency com generator comprises an oscillator (117) which oscillates a modulation signal with a pre-determined frequency, an optical resonator (110) which consists of an incidence side reflector (112), an emission side reflector (113) parallel with each other and resonates light entered via the incidence side reflector (112), and an optical phase modulator (111). The optical phase resonator (111) comprises an electrooptical crystal the refractivity of which is varied by impressing an electric field, arranged between the incidence side reflector (112) and the emission side reflector (113), modulates the phase of light resonated by the optical resonator (110) according to the modulation signal supplied from the oscillator (117), and generates a side band centered around the frequency of the entered light at the interval of the frequency of the modulation signal. The emission side reflector (113) set a transmittance for every frequency according to the light intensity of the generated side band.

[続葉有]

WO 03/010596 A1



〒144-0052 東京都大田区蒲田3丁目3番4号 Tokyo (JP). 三澤 成嘉 (MISAWA, Shigeyoshi) [JP/JP]; 〒145-0071 東京都大田区田園調布2丁目5番8号 Tokyo (JP). 中山 義宣 (NAKAYAMA, Yoshinobu) [JP/JP]; 〒158-0083 東京都世田谷区奥沢3丁目43番9号 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 小池 晃, 外(KOIKE, Akira et al.); 〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目6番4号 第11森ビル Tokyo (JP).

(81) 指定国 (国内): US.

(84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR).

添付公開書類:
— 国際調査報告書
— 補正書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

所定の周波数の変調信号を発振する発振器(117)と、互いに平行な入射側反射鏡112及び出射側反射鏡(113)から構成され、入射側反射鏡(112)を介して入射された光を共振させる光共振器(110)と、電界を印加することにより屈折率が変化する電気光学結晶からなり上記入射側反射鏡(112)と上記出射側反射鏡(113)間に配され、上記発振器(117)から供給された上記変調信号に応じて光共振器(110)において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光位相変調器(111)とを備え、上記出射側反射鏡(113)は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

明細書

光周波数コム発生器

技術分野

本発明は、光通信、光ＣＴ、光周波数標準器など多波長でコヒーレンス性の高い標準光源、又は、各波長間のコヒーレンス性も利用できる光源を必要とする分野に適用される光周波数コム発生器に関する。

背景技術

ヘテロダイン検波は、光周波数を高精度に測定する場合に、測定する光を他の光と干渉させ、発生する光ビート周波数の電気信号を検出する。このヘテロダイン検波において測定可能なレーザ光の帯域は、検波系に使用される受光素子の帯域に制限され、概ね数十GHz程度である。

一方、光の測定可能帯域は、近年の光エレクトロニクスの発展に伴い、周波数多重通信のためのレーザ光制御や、広範囲に分布する吸収線の周波数測定を行うため、更に拡大する必要がある。

かかる測定可能帯域の拡大化の要請に応えるべく、従来において、光周波数コム発生器（Optical Frequency Comb Generator）を用いた広帯域なヘテロダイン検波系が構築された。光周波数コム発生器は、周波数軸上で等間隔に配置された櫛状のサイドバンドを広帯域にわたり発生させるものであり、このサイドバンドの周波数安定度は、入射光の周波数安定度とほぼ同等である。この生成したサイドバンドと被測定光をヘテロダイン検波することにより、数THzに亘る広帯域なヘテロダイン検波系を構築することが可能となる。

図１は、この従来における光周波数コム発生器９の原理的な構造を示している。

光周波数コム発生器９は、光位相変調器９１と、この光位相変調器９１を介して互いに対向するように設置された反射鏡９２、９３を備える光共振器９０が使

用されている。

この光共振器 90 は、反射鏡 92 を介して僅かな透過率で入射した光 L_{in} を、反射鏡 92、93 間で共振させ、その一部の光 L_{out} が反射鏡 93 を介して出射する。光位相変調器 91 は、電界を印加することにより屈折率が変化する光位相変調のための電気光学結晶からなり、この光共振器 90 を通過する光に対して、電極 96 に印加される変調周波数 f_m の電気信号に応じて位相変調をかける。

この光周波数コム発生器 9 は、光が光共振器 90 内を往復する時間に同期した電気信号を電極 96 から光位相変調器 91 へ駆動入力されることにより、光位相変調器 91 を 1 回だけ通過する場合に比べ、数十倍以上の深い位相変調をかけることが可能となる。これにより、光周波数コム発生器 9 は、高次のサイドバンドを数百本生成することができる。また隣接したサイドバンドの周波数間隔 f_m は、全て入力された電気信号の変調周波数 f_m と同等になる。

ちなみに、上述した光周波数コム発生器 9 は、発生させた多数の光周波数コムに基づき被測定光の周波数を決定する場合において、例えば、周波数 ν_1 の入射光を、光位相変調器 91 により周波数 f_m で変調し、周波数間隔 f_m のサイドバンドからなる光周波数コムを発生させる。そして、この光周波数コムを周波数 ν_2 の被測定光を重ね合わせ、光周波数コムとして発生した第 N 番目のサイドバンドとの間のビート周波数 $\Delta\nu$ を測定することにより $|\nu_1 - \nu_2|$ を決定し、最後に被測定光の周波数 ν_2 を決定する。

この発生させたサイドバンドの光強度分布をより平坦化させることにより、全ての帯域において光周波数コムの感度を一定にすることができ、被測定光の周波数を精度よく測定することが可能となり、ひいては発生させたサイドバンドを検出する後段の回路において設計上の負担を軽減させることも可能となる。

しかしながら、従来型の光周波数コム発生器 9 は、図 2 に示すように、 $\Delta\nu$ の絶対値が大きくなるにつれて、換言すると入射光の周波数から離れるにつれて、サイドバンドの光強度が減少する。特にサイドバンドの光強度は、入射光の周波数と相当程度周波数差のある帯域において指数関数的に減少する。このため、サイドバンドの光強度分布は、均一にならず、ばらつきが生じてしまう。

また、光周波数コム発生器 9 は、共振させる光の損失を抑えるために高反射率

の反射鏡を用いる必要がある。しかしながら、高反射率の反射鏡は、外部の光源から供給される光をも反射することとなり、光の入射時における光損失が大きくなってしまう。

このため、被測定光の周波数を高精度に測定するためには、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができる光周波数コムを実現する必要があった。

発明の開示

上述の如き従来の実状に鑑み、本発明の目的は、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図ることにより、また入射時の光損失を軽減させることにより、入射光の周波数と相当周波数差のある帯域においても、高精度に被測定光の周波数を測定し得る光周波数コム発生器を提供することを目的とする。

本発明は、所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、入射側反射鏡と出射側反射鏡との間に配され、発振手段から供給された変調信号に応じて共振手段において共振された光の位相を変調し、入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、出射側反射鏡は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

また本発明は、所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、入射側反射鏡と出射側反射鏡との間に配され、発振手段から供給された変調信号に応じて共振手段において共振された光の位相を変調し、入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、入射側反射鏡は、入射された光の周波数において最大の透過率を有する。

また本発明は、所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された

光を共振させる共振手段と、入射側反射鏡と出射側反射鏡との間に配され、発振手段から供給された変調信号に応じて共振手段において共振された光の位相を変調し、入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、入射側反射鏡は、入射された光の周波数において最大の透過率を有し、出射側反射鏡は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

図面の簡単な説明

図 1 は、従来における光周波数コム発生器の具体的な構成例を説明するための図である。

図 2 は、従来の光周波数コム発生器における、各帯域毎の出射光の光強度分布を示した図である。

図 3 は、バルク型光周波数コム発生器の具体的な構成例を示した図である。

図 4 乃至図 4 C は、入射側反射鏡の透過率、反射率を示した図である。

図 5 は、各帯域における出射光の光強度 (P_{out}) と、入射光の光強度 (P_{in}) との比を示した図である。

図 6 は、出射側反射鏡の透過率の設定例を示した図である。

図 7 は、入射光に対する出射光の各周波数毎の光強度分布を示した図である。

図 8 は、出射側反射鏡の透過率と、透過率の規格化周波数微分の関係を示した図である。

図 9 は、周波数差 Δf に対する出射側反射鏡の透過率特性を示した図である。

図 10 は、図 9 の特性を示す反射鏡を出射側反射鏡として選択した場合における、入射光に対する出射光の光強度分布を示した図である。

図 11 は、入射側反射鏡のみに所定の透過率を設定したバルク型光周波数コム発生器を示した図である。

図 12 は、共振光の損失を低減させるべく出射側反射鏡に設定した反射率の例を示した図である。

図 13 は、出射側に所定の帯域のみ透過させるフィルタを配置したバルク型光

周波数コム発生器を示した図である。

図14は、フィルタの各周波数に対する透過率を示した図である。

図15は、フィルタから出射した光の各周波数毎の光強度分布を示した図である。

図16は、出射側反射鏡のみに所定の透過率を設定したバルク型光周波数コム発生器を示した図である。

図17は、セミモノリシック型のバルク型光周波数コム発生器の構成図である。

図18は、セミモノリシック型のバルク型光周波数コム発生器の全体構成例を模式的に示した図である。

図19は、光周波数コム発生器制御部の構成を示した図である。

図20A及び図20Bは、コ字状のバルク型光周波数コム発生器の構成図である。

図21は、コ字状のバルク型光周波数コム発生器の変形例を示した図である。

図22A及び図22Bは、コ字状のバルク型光周波数コム発生器の他の構成図である。

図23は、導波路型光周波数コム発生器の構成図である。

図24は、ファブリペロー共振した光が入射される導波路型光周波数コム発生器の入射側結合系を示した図である。

図25A及び図25Bは、入射側反射膜とファイバ反射膜間のギャップに対する、周波数 ν_1 の入射光の入射側反射膜における反射率、透過率の関係を示した図である。

図26A及び図26Bは、入射側反射膜とファイバ反射膜間のギャップの長さが a であるときの、入射側反射膜における、各周波数に対する反射率、透過率の関係を示した図である。

図27は、導波路型光周波数コム発生器の応用例を示した図である。

図28は、誘電体多層膜の表面を凸状に研磨して仕上げた場合について示した図である。

図29は、誘電体多層膜が形成された入射側光ファイバの先端形状を説明するための図である。

図 3 0 は、傷や損傷が誘電体多層膜の角部分に生じる場合について説明するための図である。

図 3 1 は、広幅領域と狭幅領域からなる電極を備える光周波数コム発生器の構成を示した図である。

図 3 2 A 乃至図 3 2 D は、広幅領域と狭幅領域からなる電極を備える光周波数コム発生器において、電極内を伝搬するマイクロ波の損失等を示した図である。

図 3 3 は、広幅領域と狭幅領域からなる電極を備える光周波数コム発生器において、電極上のマイクロ波損失と変調効率の変化について示した図である。

図 3 4 は、広幅領域と狭幅領域からなる電極を備える光周波数コム発生器において、電力一定の場合における変調効率を示した図である。

図 3 5 A 乃至図 3 5 D は、広幅領域と狭幅領域からなる電極を備える光周波数コム発生器において、電極の形状を例示した図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

図 3 は、本発明に係る光周波数コム発生器をバルク型光周波数コム発生器 1 0 へ適用した例を示した図である。この光周波数コム発生器 1 0 は、光位相変調器 1 1 1 と、この光位相変調器 1 1 1 を介して互いに対向するように設置された入射側反射鏡 1 1 2 及び出射側反射鏡 1 1 3 からなる光共振器 1 1 0 と、電極 1 1 6 と、発振器 1 1 7 とを備える。

光共振器 1 1 0 は、入射側反射鏡 1 1 2 を介して入射された光 L_{in} を、入射側反射鏡 1 1 2 及び出射側反射鏡 1 1 3 間で共振させ、その一部の光 L_{out} を出射側反射鏡 1 1 3 を介して出射する。

光位相変調器 1 1 1 は、例えばニオブ酸リチウム ($LiNbO_3$) 等のバルク結晶からなり、供給される電気信号に基づき通過する光を位相変調する光デバイスである。この光位相変調器 1 1 1 は、屈折率が電界に比例して変化するポッケルス効果や、屈折率が電界の自乗に比例して変化するカー効果等の物理現象を利用し、通過する光の変調を行う。

入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 113 は、光共振器 110 に入射した光を共振させるために設けられたものであり、光位相変調器 111 を通過する光を往復反射させることにより共振させる。入射側反射鏡 112 は、光位相変調器 111 の光入射側に配され、図示しない光源から周波数 ν_1 の光 L_{in} が入射される。入射側反射鏡 112 は、出射側反射鏡 113 を反射して光位相変調器 111 を通過した光を反射する。出射側反射鏡 113 は、光位相変調器 111 の光出射側に配され、光位相変調器 111 を通過した光を反射する。また、この出射側反射鏡 113 は、光位相変調器 111 を通過した光を所定の割合で外部へ出射する。

ちなみに、この入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 113 は、光位相変調器 111 の外部に配される場合のみならず、光位相変調器 111 の入射側端面及び出射側端面に、多層膜端面ミラーとして装着してもよい。なお、これら入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 113 の透過率は、後に詳細に説明する。

電極 116 は、変調電界の方向が光の伝搬方向に対して直角になるように光位相変調器 111 の上面と底面に形成される。電極 116 は、発振器 117 から供給された電気信号を光位相変調器 111 へ駆動入力する。発振器 117 は、電極 116 に接続され、周波数 f_m (例えば、約 10 GHz) の電気信号を供給する。

上述の構成からなるバルク型光周波数コム発生器 10 は、光が光共振器 110 内を往復する時間に同期した電気信号を電極 116 を介して光位相変調器 111 へ駆動入力することにより、光位相変調器 111 を 1 回だけ通過する場合に比べ、数十倍以上の深い位相変調をかけることが可能となる。これにより、バルク型光周波数コム発生器 10 は、入射光の周波数を中心として、数百本ものサイドバンドを広帯域にわたり生成させることができる。また、隣接したサイドバンドの周波数間隔は、全て入力された電気信号の周波数 f_m と同等である。

次に光共振器 110 を構成する入射側反射鏡 112 の透過率について説明する。入射側反射鏡 112 の透過率は、図 4A に示すように、入射光の周波数 ν_1 において最大となるように設定されている。この図 4A における横軸は周波数 ν を示している。この入射側反射鏡 112 の透過率は、周波数 ν_1 以外の帯域において、 ν_1 における透過率よりも低く設定されている。透過率の分布曲線は、 ν_1 において極大となるが、曲線の傾きは、急峻である場合のみならず、緩やかな場合であ

ってもよい。すなわち、入射光は、入射側反射鏡 1 1 2 をある一定の帯域幅をもって透過することも可能である。更に、この ν_1 における反射率は、0%に漸近する場合のみならず、ほぼ100%に近い場合であってもよい。

すなわち、入射側反射鏡 1 1 2 の透過率を上述のように制御することにより、光源から供給される周波数 ν_1 の光は、容易に入射側反射鏡 1 1 2 を介して光位相変調器 1 1 1 へ入射することができる。また、光位相変調器 1 1 1 内部において共振する光に変調信号を駆動入力することにより、広帯域にわたり多数のサイドバンドが発生するが、入射側反射鏡 1 1 2 の透過率は、周波数 ν_1 以外の帯域において低く設定されている。このため、図 4 B に示すとおりの発生した光周波数 ω_m の殆どのサイドバンドは、入射側反射鏡 1 1 2 を介して外部に透過することはなく、光位相変調器 1 1 1 内部において往復反射を繰り返す。

また、本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 1 0 は、入射側反射鏡 1 1 2 を介して入射光の透過可能な帯域幅 (BW) を序々に狭めることにより、共振時における光の損失を序々に軽減させることができる。これにより各サイドバンドの光量は、図 4 C に示すように、入射光の透過可能な帯域幅を狭めるにつれて、序々に増大する。

また本発明は、入射光の透過可能な帯域幅が図 4 C に示すように例えば周波数 f_m の約 8 倍程度にわたるような広範囲の場合でも、共振時の光損失を軽減させることが可能となる。すなわち本発明は、入射側反射鏡 1 1 2 において、入射光の周波数 ν_1 以外の周波数帯域を透過させることができる場合でも、周波数 ν_1 において反射率が最小であれば適用可能である。

更に、本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 1 0 は、入射光の周波数 ν_1 のみ透過可能とし、周波数 ν_1 以外の帯域における反射率が100%の場合 (理想条件) において、図 4 C に示すように共振時における光の損失を最低限度にまで抑え込むことができ、サイドバンドの光量を増大させることができる。

すなわち、このバルク型光周波数コム発生器 1 0 は、入射光の周波数 ν_1 以外の帯域におけるサイドバンドの外部への透過を防止することができる。これにより、本発明は、光損失を軽減でき、効率よく光周波数コムを生成することができる。

また本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 1 0 は、入射光の周波数 ν_1 に

において透過率は最大となり、入射時の光損失を軽減することができるため、更なる効率化を図ることができる。さらに、このバルク型光周波数コム発生器 10 は、小出力の光源を使用する場合においても、共振光出力を増大させることもできる。

次に光共振器 110 を構成する出射側反射鏡 113 の透過率について説明する。

出射側反射鏡 113 の透過率は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。出射側反射鏡 113 の透過率は、換言すれば、周波数に応じて光強度が増減するサイドバンドの物理的性質に着目して設定される。このため、光共振器 110 内部のサイドバンドの光強度 P_{inside} について考察する必要がある。

図 5 は、出射側反射鏡 113 を出射する光（以下、出射光という）の光強度 P_{out} と、入射側反射鏡 112 へ入射される光（以下、入射光という）の光強度 P_{in} との比を示している。 P_{out} は、材料の特性をも含めた詳細なシミュレーションに基づき算出したものであり、生成したサイドバンドのスペクトル分布を図 5 に示すように包絡線で近似している。またこの図 5 に示される傾向は、出射側反射鏡 113 の透過率において、全ての帯域において一定であるものと仮定している。縦軸は、入射光の光強度に対する出射光の光強度の比 ($P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$) を示し、また横軸は、発生した各サイドバンドの周波数と上記入射光の周波数 ν_1 との差 Δf を示している。

図 5 に示すように、出射光の光強度 P_{out} は、 $\Delta f = 0$ において、換言すると入射光の周波数 ν_1 において最大となり、周波数差 Δf に応じて指数関数的に変化する曲線となる。

また、この出射側反射鏡 113 から出射する出射光の光強度 P_{out} は、群屈折率分散の影響しない範囲において、近似的に式 (1) で表すことができる。

$$P_{\text{out}} = T_{\text{in}} T_{\text{out}} \exp \{ - | \Delta f | \text{Los} / (\beta f m) \} P_{\text{in}} \quad \dots (1)$$

この式 (1) において、 T_{in} は入射側反射鏡 112 の透過率、 T_{out} は出射側反射鏡 113 の透過率であり、 β は光共振器 110 内を往復する間における変調指数、 Los は光共振器 110 内を往復する光の損失レートであり、それぞれ定数で表される。仮に、光共振器 110 内における光の損失要因が、入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 113 を介した外部への透過のみである場合、 Los は、 T_{in} と T_{out} の和となる。

式 (2.1) 及び式 (2.2) は、式 (1) から推定した、上述の Δf に対する、

光共振器 110 内部のサイドバンドの光強度 P_{inside} の変化率を示している。

$$dP_{\text{inside}}/d\Delta f = -\text{Los}/(\beta f m) P_{\text{inside}} \quad \Delta f > 0 \text{ の場合} \quad \dots (2.1)$$

$$dP_{\text{inside}}/d\Delta f = \text{Los}/(\beta f m) P_{\text{inside}} \quad \Delta f < 0 \text{ の場合} \quad \dots (2.2)$$

すなわち、この式 (2.1) 及び式 (2.2) は、 Δf に関する微分方程式で表すことができ、サイドバンドの光強度 P_{inside} の変化率を Δf の関数として求めることができる。

この式 (2.1) は、 $\Delta f > 0$ の場合、すなわち入射光の周波数よりも高い帯域における光強度の変化率を表し、また式 (2.2) は、 $\Delta f < 0$ の場合、すなわち入射光の周波数よりも低い帯域における光強度の変化率を表す。更に $\Delta f = 0$ の場合 (入射光の周波数の場合) に、サイドバンドの光強度は、入射側反射鏡 112 を透過した光の光強度で表すことができ、例えば式 (2.3) において示されるように、入射光の光強度 P_{in} と入射側反射鏡 112 の透過率 T_{in} の積で表すことができる。

$$P_{\text{inside}} = T_{\text{in}} \times P_{\text{in}} \quad \dots (2.3)$$

この式 (2.1) ~ (2.3) により計算した P_{inside} から、式 (2.4) に基づき、出射光の光強度 P_{out} を算出することができる。

$$P_{\text{out}} = T_{\text{out}} \times P_{\text{inside}} \quad \dots (2.4)$$

また、 T_{out} と T_{in} を定数として、式 (2.1) ~ (2.4) を整理することにより、式 (1) を導くことも可能である。

本発明は、上述の式で示すことができる共振器 110 内のサイドバンドの光強度 P_{inside} を各スペクトル毎に平坦化処理を施して外部に出射する。本発明は、換言すれば、出射側反射鏡 113 において各周波数帯域毎に透過率 T_{out} を設定することにより、外部へ出射する光強度をコントロールする。

かかる出射側反射鏡 113 の透過率 T_{out} の条件は、 $dP_{\text{out}}/d\Delta f = 0$ として、式 (2.1) ~ (2.4) に代入して計算することにより、以下に示す式 (3.1)、(3.2) で表すことができる。

$$dT_{\text{out}}/d\Delta f = \text{Los}/(\beta f m) T_{\text{out}} \quad \dots (3.1)$$

$$dT_{\text{out}}/d\Delta f = -\text{Los}/(\beta f m) T_{\text{out}} \quad \dots (3.2)$$

出射側反射鏡 113 の透過率 T_{out} は、この式 (3.1)、(3.2) に基づいて決定

される。なお、 $\Delta f = 0$ の場合における透過率（以下、この透過率を初期値という）の設定如何により、上述の式（3.1）、（3.2）を計算する際に多数の解が得られる場合がある。

図6は、式（3.1）、（3.2）に基づき、出射側反射鏡113の透過率 T_{out} を求めた結果を示している。 L_{os} は、共振器110内を往復する間の全損失であり、 $L_{os} = T_{in} + T_{out}$ であると仮定し、また $T_{in} = 0.005$ としている。この図6において、曲線Bと曲線Cは、それぞれ初期値が異なる。

図7は、出射側反射鏡113を用いた場合の入射光に対する出射光の各帯域における光強度比を示している。この図7において、曲線A'は、図5に示される光強度分布を重ね合わせたものである。曲線B'は、出射側反射鏡115を、図6の曲線Bで示される透過率 T_{out} に設定した場合における出射光 P_{out} の光強度分布を表している。また曲線C'は、出射側反射鏡113を、図6の曲線Cで示される透過率 T_{out} に設定した場合における出射光 P_{out} の光強度分布を表している。この図7に示すように、曲線B'及び曲線C'は、入射光の周波数近傍において光強度特性が平坦化されている。

この図7において、曲線B'は、入射光の周波数近傍を除く帯域において、また曲線C'は、全帯域において、曲線A'よりも光強度が高くなっており、光周波数コムを高効率で発生させることができる。これは、光共振器内部に発生したサイドバンドに対して直接的にフィルタリングすることができるため、光損失をより軽減させることができるからである。

また本発明は、初期値を制御することにより、曲線B'のように広帯域において光強度特性を平坦化させたり、曲線C'のように狭い帯域において光強度の高い光周波数コムを発生させることができる。これにより実施者は、初期値を制御することにより、帯域幅若しくは光強度のどちらを優先させるか任意に選択することができる。

更に、本発明は、この初期値を制御されることにより、全帯域においてサイドバンドの平坦化を図る場合のみならず、一部の帯域においてサイドバンドの強度分布の平坦化を図ることも可能である。かかる場合において、透過率 T_{out} は、図6に示すように $\Delta f = 0$ において最小とならず、例えば右上がりの曲線になる場合

もある。

図 8 は、透過率 T_{out} と、透過率の規格化周波数微分の絶対値との関係を示している。この図 8 は、換言すれば、 $Los_0 = Los - T_{out}$ の値に対して、最適な透過率及び透過率の変化の割合の関係を示している。本発明に係る光周波数コム発生器を実際設計する場合に、出射側反射鏡 113 として用いるミラーについては、設計上可能な反射特性を有するミラーの中から、部分的にこの図 8 の特性を示すミラーを採用する。

図 9 は、ローレンツ型反射特性を示し、かつ $T_{out} = 0.01$ であるときに曲線の傾き $dT_{out}/d\Delta f$ が -13 dB/THz である、出射側反射鏡 113 の透過率特性を示している。本発明は、出射側反射鏡 113 として、この図 9 に示す透過率特性を示し、かつ図 8 の条件を満たすミラーを用いたときに、発生させた光周波数コムの平坦化を図ることが可能となる。図 10 は、この発生させた光周波数コムを平坦化させた場合における入射光に対する出射光の各帯域における光強度比を示している。

すなわち、本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 10 は、出射側反射鏡 113 の透過率特性を上述のように制御することにより、出射光の光強度の低下を防ぎつつ、発生したサイドバンドの平坦化を図ることができる。

また、本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 10 は、さらに入射側反射鏡 112 の透過率特性を上述のように設定することにより、入射光の周波数 ν_1 以外の帯域におけるサイドバンドが外部へ透過するのを防止することができ、また入射時の光損失を更に軽減させることができる。例えば式 (2.1) に示される入射光の光強度 P_{in} と入射側反射鏡 112 の透過率 T_{in} に対して、図 4 に示される透過率特性を代入して P_{out} を求めると、理想条件下において、図 7 に示される入射光に対する出射光の光強度を約 20 dB 向上させることができる。すなわち、本発明は、上述の入射側反射鏡 112 と出射側反射鏡 113 とを双方備えることにより、出射光の光強度を相乗的に向上させることが可能となる。

すなわち、本発明を適用したバルク型光周波数コム発生器 10 は、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図ることができるため、全ての帯域において光周波数コムの感度を一定にすることができる。また本発明を適用したバ

バルク型光周波数コム発生器 10 は、さらに光損失を極力抑えることができるため、入射光の周波数と相当周波数差のある帯域においても、高精度に被測定光の周波数を測定することができる。このバルク型光周波数コム発生器 10 は、各帯域において均一かつ光強度の高いサイドバンドを多数生成させることができるため、例えば、波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing、DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 通信方式における光送信装置に適用することにより、波長の異なる多数の光を生成し、当該生成した光を搬送波として変調をかけることにより光変調信号を作り出し、これらを多重化して送信することも可能となる。

なお、本発明は、入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 113 それぞれについて上述した透過率が設定されている場合のみならず、例えば入射側反射鏡 112 のみ、或いは出射側反射鏡 113 のみに対して、上述した透過率を設定してもよい。

図 11 は、入射側反射鏡のみに、上述した透過率を設定したバルク型光周波数コム発生器 11 を示している。なお、バルク型光周波数コム発生器 10 と同一の要素、部材には同一の番号を付して説明を省略する。

バルク型光周波数コム発生器 11 は、光位相変調器 111 と、この光位相変調器 111 を介して互いに対向するように設置された入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 123 からなる光共振器 110 と、電極 116 と、発振器 117 とを備える。

光共振器 110 は、入射側反射鏡 112 を介して僅かな透過率で入射した光 L_{in} を、入射側反射鏡 112 及び出射側反射鏡 123 間で共振させ、その一部の光 L_{out} を出射側反射鏡 123 を介して出射する。

出射側反射鏡 123 は、共振光の損失を低減させるため、図 12 に示すように一定の高反射率を維持している。出射側反射鏡 123 は、生成した光周波数コムを被測定光と干渉させるため、一定の割合で光を外部に出射する必要があり、図 12 に示すように、反射率を 100% より若干低く、例えば約 97% 程度に設定している。

出射側反射鏡 123 は、反射率の分布曲線をフラットな形状に制御することに

より、生成した広帯域にわたる光周波数コム全てを外部に出射する。なお、この反射率の分布曲線は、出射光のスペクトルを平坦にするため、様々なバリエーションの曲線へ意図的に制御してもよい。

このような構成からなるバルク型光周波数コム発生器 1 1 は、入射光の周波数 ν_1 以外の帯域におけるサイドバンドが外部へ透過するのを防止することができ、また入射時の光損失を更に軽減させることができる。

また本発明は、以下に説明するバルク型光周波数コム発生器 1 2 のように、出射側に所定の帯域のみ透過させるフィルタを配置してもよい。

図 1 3 は、バルク型光周波数コム発生器 1 2 の構成を示している。なお、バルク型光周波数コム発生器 1 0 と同一の要素、部材には同一の番号を付して説明を省略する。

バルク型光周波数コム発生器 1 2 は、光位相変調器 1 1 1 と、この光位相変調器 1 1 1 を介して互いに対向するように設置された入射側反射鏡 1 1 2 及び出射側反射鏡 1 2 3 からなる光共振器 1 1 0 と、フィルタ 1 1 4 と、電極 1 1 6 と、発振器 1 1 7 とを備える。

光共振器 1 1 0 は、入射側反射鏡 1 1 2 を介して僅かな透過率で入射した光 L_{in} を、入射側反射鏡 1 1 2 及び出射側反射鏡 1 2 3 間で共振させ、その一部の光 L_{out} を出射側反射鏡 1 2 3 を介して出射する。入射側反射鏡 1 1 2 及び出射側反射鏡 1 2 3 は、光共振器 1 1 0 に入射した光を共振させるため設けられたものであり、光位相変調器 1 1 1 を通過する光を往復反射させることにより共振させる。

フィルタ 1 1 4 は、出射側反射鏡 1 2 3 から出射される光を一定の透過率の下、外部へ出射する。フィルタ 1 1 4 の透過率は、図 1 4 に示すように、入射光の周波数 ν_1 において最小となるように設定されている。また、このフィルタ 1 1 4 の透過率は、周波数 ν_1 以外の帯域において、 ν_1 における透過率よりも高く設定され、100%付近に設定される場合もある。透過率の分布曲線における傾きは、急峻である場合のみならず、緩やかな場合であってもよい。

更にこの透過率の分布曲線は、周波数差 Δf に応じて指数関数的に変化する光強度に着目し、指数関数的に透過率を変化させてフィルタ 1 1 4 から出射する光

の光強度分布を平坦化させることも可能である。フィルタ 114 の透過率は、式 (1) に基づき、フィルタ 114 から出射する光の光強度分布が平坦になるように設定する。すなわちフィルタ 114 の透過率は、波長に応じて指数関数的に変化する出射光の光出力 P_{out} を平坦化させるため、波長に応じて指数関数的に変化させる。図 15 は、周波数差 Δf に応じてフィルタ 114 の透過率を指数関数的に変化させた結果、フィルタ 114 から出射した光の強度分布 ($=P_{out}/P_{in}$) を平坦化させた例を示している。

すなわち、このバルク型光周波数コム発生器 12 は、フィルタ 114 の透過率特性を上述のように制御することにより、フィルタ 114 から出射する光の光強度分布を平坦化させることができる。これにより、本発明は、入射光の周波数と相当程度周波数差のある帯域においても、より高精度に被測定光の周波数を測定しうる光周波数コムを発生させることができる。

図 16 は、出射側反射鏡 113 のみに、上述した透過率を設定したバルク型光周波数コム発生器 13 を示している。なお、バルク型光周波数コム発生器 10 と同一の要素、部材には同一の番号を付して説明を省略する。

バルク型光周波数コム発生器 13 は、光位相変調器 111 と、この光位相変調器 111 を介して互いに対向するように設置された入射側反射鏡 122 及び出射側反射鏡 113 からなる光共振器 110 と、電極 116 と、発振器 117 とを備える。

光共振器 110 は、入射側反射鏡 122 を介して僅かな透過率で入射した光 L_{in} を、入射側反射鏡 122 及び出射側反射鏡 113 間で共振させ、その一部の光 L_{out} を出射側反射鏡 113 を介して出射する。

入射側反射鏡 122 は、光位相変調器 111 の光入射側に配され、図示しない光源から周波数 ν_1 の光 L_{in} が入射される。また、この入射側反射鏡 122 は、出射側反射鏡 113 を反射して光位相変調器 111 を通過した光を反射する。この入射側反射鏡 122 の透過率は、任意に設定され、上述の如く入射光の周波数 ν_1 において最大となるように設定されている場合に限定されるものではない。

また、出射側反射鏡 113 の透過率は、上述の如く、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

このような構成からなるバルク型光周波数コム発生器 13 は、出射光の光強度の低下を防ぎつつ、発生したサイドバンドの平坦化を図ることができる。これにより、バルク型光周波数コム発生器 13 は、入射光の周波数と相当周波数差のある帯域においても、高精度に被測定光の周波数を測定することができる。

なお、本発明に係るバルク型光周波数コム発生器 13 は上述した実施の形態に限定されるものではなく、例えば、図 17 に示すようなセミモノリシック型のバルク型光周波数コム発生器 15 に適用してもよい。

このバルク型光周波数コム発生器 15 は、光変調を行うビーム光を通過させる電気光学結晶 151 からなるセミモノリシック光変調器 150 と、セミモノリシック光変調器 150 の出射端側に配置された可動ミラー 160 とを備える。

上記セミモノリシック光変調器 150 は、例えばニオブ酸リチウム (LiNbO_3) など電圧で光を位相変調できる電気光学結晶 151 からなり、その入射端面に HR コーティングにより高反射膜 151A が形成されているとともに、出射端面に AR コーティングにより無反射膜 151B が形成されている。高反射膜 A の透過率は、図 4A に示すように、入射光の周波数 ν_1 において最大となるように設定してもよい。

また、上記可動ミラー 160 は、高反射膜 161A が形成されており、この高反射膜 161A と上記セミモノリシック光変調器 150 の入射端面の高反射膜 151A とで共振器を構成している。そして、この可動ミラー 160 は、PZT 等の電気機械変換素子 162 により移動されるようになっている。高反射膜 A の透過率は、図 6 に示すように、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率が設定されていてもよい。

このように入射端側に高反射膜 151A を有する電気光学結晶 151 からなるセミモノリシック光変調器 150 と、上記セミモノリシック光変調器 150 の出射端側に配置され、PZT 等の電気機械変換素子 162 により移動される高反射膜 161A の形成された可動ミラー 160 とで構成されたセミモノリシック構成の光周波数コム発生器 100 では、共振器長 (FSR) の粗調整を上記電気機械変換素子 162 に固定された上記可動ミラー 160 全体を移動させて位置調整することにより行い、上記電気機械変換素子 162 を駆動して上記可動ミラー 16

0を移動させることにより共振器長(FSR)の微調整を行うことができる。

すなわち、このバルク型光周波数コム発生器15では、入射端側に高反射膜151Aを有する電気光学結晶151からなるセミモノリシック光変調器150と、上記セミモノリシック光変調器150の出射端側に配置され、電気機械変換素子162により移動される高反射膜161Aの形成された可動ミラー160とで構成されたセミモノリシック構成としたことにより、上記電気光学結晶151の結晶長に関係なく、変調周波数を任意に設定することができる。また図17では、入射端側に高反射膜151Aを形成し、出射端側に可動ミラー160を構成する場合を例にとり説明をしたが、可動ミラー160を入射端側とし、高反射膜151Aを出射端側として構成してもよいことは勿論である。かかる場合において、光Linは、可動ミラー160における高反射膜161Aを介して入射され、共振された光は、高反射膜151Aを介して外部へと出射することとなる。

このような構造のバルク型光周波数コム発生器15は、例えば図18に示すように、ファイバ入力コリメータ光変換器171及び集光レンズ172から成る入射側光学系170を介して基本波としての光ビームLinが入射される。そして、上記セミモノリシック光変調器150において、セミモノリシック光変調器150内に入射した光の位相を変調することにより、高反射膜からなる出射端を介して光周波数コムLoutを取り出し、集光レンズ181及びファイバ出力コリメータ光変換器182からなる出射側光学系180を介して上記光周波数コムLoutを出射する。

ここで、このバルク型光周波数コム発生器15において、上記出射側光学系180を介して出射された光周波数コムLoutは、光カプラ185によりその一部が分割されて図19に示すような構成の光周波数コム発生器制御部200に供給される。

光周波数コム発生器制御部200は、上記セミモノリシック光変調器150に変調信号fm1として与えるマイクロ波信号を発生するマイクロ波発振器201を備え、このマイクロ波発振器201により発生されたマイクロ波信号が、マイクロ波増幅器202により増幅されてマイクロ波方向性結合器203を介して変調信号fm1として上記セミモノリシック光変調器150に供給されるとともに、

上記マイクロ波方向性結合器203からアッテネータ205及び可変位相器206を介して二重平衡変調器207に供給されるようになっている。

この光周波数コム発生器制御部200は、上記マイクロ波信号を変調信号 f_m 1として上記セミモノリシック光変調器150の図示しない電極に印加する。上記セミモノリシック光変調器150は、上記入射側光学系170を介して入射された基本波としての光ビーム L_{in} の位相を上記変調信号 f_m 1に応じて変調し、高反射膜161Aの形成された可動ミラー160を介して光周波数コム L_{out} を出力する。

また、この光周波数コム発生器制御部200は、上記光カプラ185により分割された光周波数コム L_{out} が入射される光ファイバ入力高速フォトレシーバ208を備え、このフォトレシーバ208の出力が上記二重平衡変調器207に供給されている。そして可動ミラー160は、上記二重平衡変調器207の出力が積分器209を介して上記電気機械変換素子162に供給されることにより帰還制御される。

このような構成からなる光周波数コム発生器15は、上述した光周波数コム発生器10の効果に加えて、電気光学結晶の結晶長に関係なく、変調周波数を任意に設定することができる。またこの光周波数コム発生器15は、部品点数を省略することができ、高反射膜161Aを可動ミラー160に対して直接被覆しているため、共振させる光の漏洩を更に防止することが可能となる。

また、このような構成からなる光周波数コム発生器15は、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができるため、あらゆる帯域においても、被測定光の周波数を高精度に測定することができる。また電気光学結晶の結晶長に関係なく変調周波数を任意に設定することができる。

また、このような構成からなる光周波数コム発生器15は、波長多重通信方式における光送信装置に適用することにより、波長の異なる多数の光を生成し、当該生成した光を搬送波として変調をかけて光変調信号を作り出し、これらを多重化して送信することも可能となる。

なお本発明に係るバルク型光周波数コム発生器10は、上述した実施の形態に

限定されるものではなく、例えば、以下に説明するコ字状のバルク型光周波数コム発生器 17 に適用してもよい。

このバルク型光周波数コム発生器 17 は、図 20 A に示すように、光変調を行うビーム光を通過させる電気光学結晶からなるバルク型光共振器 210 と、上記バルク型光共振器 210 を内蔵する空洞マイクロ波共振器 220 とからなる。

上記バルク型光共振器 210 は、例えばニオブ酸リチウム等のように電圧で光を位相変調できる電気光学結晶にそれぞれ高反射膜により形成した入射端 210 A と出射端 210 B を設けてなるモノリシック構成の光共振器である。

入射端 210 A の透過率は、図 4 A に示すように、入射光の周波数 ω_1 において最大となるように設定されている。また、出射端 210 B の透過率は、図 6 に示すように、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率が設定されている。

上記空洞マイクロ波共振器 220 は、マイクロ波に共振する空洞 223 を備える。上記空洞マイクロ波共振器 220 の空洞 223 は、図 20 B に示すように、上記バルク型光共振器 210 が設置された中央空洞部 223 B と、上記バルク型光共振器 210 の前後の入射側空洞部 223 A 及び出射側空洞部 223 C からなり、コ字状に折り曲げた形状に形成されている。上記バルク型光変調器の前後の入射側空洞部 223 A 及び出射側空洞部 223 C の各空洞長 A は、空洞の幅 B とし、真空中での伝搬波長を $\lambda_0 = C / f_m$ (C は光速) として、

$$\lambda = 1 / \sqrt{\{1 / \lambda_0^2 - 1 / (4 B^2)\}}$$

にて示される共振周波数の波長 λ の $1 / 4$ 、すなわち、

$$A = \lambda / 4$$

に調整されている。これにより、結晶端面における空洞 223 に対するインピーダンスが大きくなるように制御することが可能となる。

このような構造の空洞マイクロ波共振器 220 では、上記バルク型光共振器 210 の前後に入射側空洞部 223 A 及び出射側空洞部 223 C を設け、各空洞長を共振周波数の波長の $1 / 4$ とすることによって、中央空洞部 223 B のみの場合と同じ共振モードで当該バルク型光共振器 210 を動作させてマイクロ波の漏れを抑えることができる。また、上記空洞マイクロ波共振器 220 は、上記バルク

型光共振器 210 の前後に入射側空洞部 223 A 及び出射側空洞部 223 C を設けるようにしたものであっても、空洞 223 をコ字状に折り曲げた構造とすることにより、大型化することがない。

ここで、上記空洞マイクロ波共振器 220 は、上記バルク型光共振器 210 を納める溝部 221 を有する第 1 の金属ブロック 222 と、マイクロ波に共振する空洞 223 を上記第 1 の金属ブロック 222 とともに形成する第 2 の金属ブロック 224 と、上記第 2 の金属ブロック 224 を上記第 1 の金属ブロック 222 の溝部 221 に取り付ける取付け板 225 と、上記第 1 の金属ブロック 222 の側壁を覆う金属カバー 240 からなり、上記中央空洞部 223 B が上記第 1 の金属ブロック 222 の溝部 221 に沿って形成され、上記入射側空洞部 223 A 及び出射側空洞部 223 C が上記第 1 の金属ブロック 222 の側壁に沿って形成され、上記溝部 221 に配置される上記バルク型光共振器 210 を上記第 1 の金属ブロック 222 の溝部 221 の底面 221 A と第 2 の金属ブロック 224 とで挟持するようになっている。なお、上記第 2 の金属ブロック 224 は、マイカなどの絶縁材料からなる絶縁板 230 を介して上記取付け板 225 に接着固定されている。

また、上記空洞マイクロ波共振器 220 には、収納したバルク型光共振器 210 の入射端と出射端に対応する位置に、入射光窓 223 W I と出射光窓 223 W O が形成されている。

なお、上記空洞マイクロ波共振器 220 は、図示しないマイクロ波電源からマイクロ波信号が給電されるコネクタピン 229 が、上記第 1 の金属ブロック 222 を貫通して上記第 2 の金属ブロック 224 に当接されるように設けられている。空洞マイクロ波共振器 220 は、このコネクタピン 229 に供給されるマイクロ波信号に共振させることにより、上記マイクロ波信号に応じた電界を上記バルク型光共振器 210 を構成している電気光学結晶に印加する。

上記バルク型光共振器 210 は、上記空洞マイクロ波共振器 220 に内蔵されているので、上記空洞マイクロ波共振器 220 がコネクタピン 229 に供給されるマイクロ波信号に共振することにより、上記マイクロ波信号に応じた電界が印加され、上記マイクロ波信号に応じて屈折率が変化する。これにより、上記バルク型光共振器 110 は、入射端反射膜を介して入射された基本波としての光ビー

μLinに対して上記マイクロ波信号に応じた光位相変調を施すバルク型光位相変調器として機能する。

すなわち、このバルク型光周波数コム発生器17では、入射光窓223WIから入射端反射膜を介してバルク型光共振器210に入射された基本波としての光ビームLinに対して、マイクロ波信号に応じて光位相変調することができる。このため、バルク型光周波数コム発生器17は、光ビームLinの位相を変調して、出射端反射膜を介して出射光窓223WOから光周波数コムLoutを出射することができる。

またこのバルク型光周波数コム発生器17は、入射端210Aの透過率を、図4Aに示される入射側反射鏡112の透過率とし、また出射端210Bの透過率を、図6に示される出射側反射鏡113の透過率として夫々設定することにより、生成されるサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができ、光周波数コムを効率よく発生させることができる。

ここで、上記バルク型光周波数コム発生器17のように、上記溝部221に配置される上記バルク型光共振器210を上記第1の金属ブロック222の溝部221の底面221Aと第2の金属ブロック224とで挟持する構造を採用する場合、図21に示すように、上記第2の金属ブロック224を凹部226が設けられた金属ブロック227と上記凹部226の形成された面に配置された金板ばね228から構成し、上記金板ばね228を介して上記凹部226と対向するように上記第1の金属ブロック222の溝部221に上記バルク型光共振器210を配置して、上記金板ばね228と上記第1の金属ブロック222の溝部221の底面221Aとで上記バルク型光共振器210を弾撥的に挟持固定するようにする。これにより、バルク型光周波数コム発生器17は、上記金板ばね228を弾性変位させることによって、上記第1の金属ブロック222の溝部221の底面221Aと第2の金属ブロック224との間隔Dを微調整することができる。

なお、図20に示したバルク型光周波数コム発生器17では、上記第2の金属ブロック224がマイカなどの絶縁材料からなる絶縁板230を介して上記取付け板225に接着固定されているが、図21に示すように、上記金属ブロック227と金板ばね228との間に絶縁板230を配し、上記第2の金属ブロック2

24を上記取付け板225に直接接着固定する構造とすることもできる。

また、上記第2の金属ブロック224に設けた凹部226に、グラファイトなどの熱伝導材料250を収納することにより、上記バルク型光共振器210を構成している電気光学結晶に発生する熱を上記熱伝導材料250を介して第2の金属ブロック224に効率よく逃がすことができる。したがって、発熱による電気光学結晶の膨張等の影響を少なくすることができ、バルク型光コム発生器17を安定して動作させることができる。

上記バルク型光周波数コム発生器17では、上記空洞マイクロ波共振器220のマイクロ波に共振する空洞223をコ字状に形成した構造としたが、入射側空洞部223A及び出射側空洞部223Cの両端を連通させて、閉ループ状の空洞を備える構造としてもよい。

また、このバルク型光周波数コム発生器17は、図17に示すように、入射端側に対して高反射膜210Aを形成し、出射端側を可動ミラーとして構成することにより、セミモノリシック型の光周波数コム発生器としてもよい。

また、このような構成からなるバルク型光周波数コム発生器17は、波長多重通信方式における光送信装置に適用することにより、波長の異なる多数の光を生成し、当該生成した光を搬送波として変調をかけて光変調信号を作り出し、これらを多重化して送信してもよい。

図22A及び図22Bは、閉ループ状に形成した空洞323を備える示すバルク型光周波数コム発生器18の構成例を示している。

このバルク型光周波数コム発生器18は、図22Aに示すように、光変調を行うビーム光を通過させる電気光学結晶からなるバルク型光共振器310と、上記バルク型光共振器310を内蔵する空洞マイクロ波共振器320とからなる。

上記バルク型光共振器310は、例えばニオブ酸リチウムなど電圧で光を位相変調できる電気光学結晶にそれぞれ高反射膜により形成した入射端310Aと出射端310Bを設けてなるモノリシック構成の光共振器である。入射端310Aの透過率は、図4Aに示すように、入射光の周波数 ω_1 において最大となるように設定されている。また出射端310Bの透過率は、図6に示すように、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率が設定されている。

上記空洞マイクロ波共振器 320 は、図 22B に示すように、閉ループ状に形成された空洞 323 を備えている。この空洞部 323 は、上記バルク型光共振器 310 が設置された空洞部 323A と、この空洞部 323A の両端を連通させるコ字状に形成された空洞部 323B とから構成される。

ここで、上記空洞マイクロ波共振器 320 は、上記バルク型光共振器 310 を納める溝部 321 を有する第 1 の金属ブロック 322 と、マイクロ波に共振する閉ループ状の空洞 323 を上記第 1 の金属ブロック 322 とともに形成する第 2 の金属ブロック 324 及び金属カバー 340 と、上記第 2 の金属ブロック 324 を上記第 1 の金属ブロック 322 の溝部 321 に取り付ける取付け板 326 とからなり、上記金属カバー 340 により覆われた上記第 1 の金属ブロック 322 の溝部 321 内に閉ループ状の空洞 323 が形成されている。また空洞マイクロ波共振器 320 は、上記バルク型光共振器 310 を上記第 1 の金属ブロック 322 の溝部 321 に配置し、上記溝部 321 の底面 321A と第 2 の金属ブロック 324 とで挟持するようになっている。なお、上記第 2 の金属ブロック 324 は、マイカなどの絶縁材料からなる絶縁板 330 を介して上記取付け板 325 に接着固定されている。

この空洞マイクロ波共振器 320 は、外部より上記空洞部 323A に周波数調整板 350 を挿入して、その挿入量を調整することによって、共振周波数を調整することができるようになっている。

また、空洞の幅 B は、真空中での伝搬波長を $\lambda_0 = C / f_m$ (C は光速) として、 $B = \lambda_0 / 2$ になっている。

また、上記空洞マイクロ波共振器 320 は、上記第 1 の金属ブロック 322 の溝部 321 に収納したバルク型光共振器 310 の入射端と出射端に対応する位置に、入射光窓 323WI と出射光窓 323WO が形成されている。

なお、上記空洞マイクロ波共振器 320 は、図示しないマイクロ波電源からマイクロ波信号が給電されるコネクタピン 329 が上記第 2 の金属ブロック 324 に当接されるように設けられており、このコネクタピンに供給されるマイクロ波信号に共振することにより、上記マイクロ波信号に応じた電界を上記バルク型光

共振器 310 を構成している電気光学結晶に印加する。

上記バルク型光共振器 310 は、上記空洞マイクロ波共振器 320 に内蔵されているので、上記空洞マイクロ波共振器 320 がコネクタピンに供給されるマイクロ波信号に共振することにより、上記マイクロ波信号に応じた電界が印加され、上記マイクロ波信号に応じて屈折率が変化する。これにより、上記バルク型光共振器 310 は、入射端反射膜を介して入射された基本波としての光ビーム *Lin* に対して上記マイクロ波信号に応じた光位相変調を施すバルク型光位相変調器として機能する。

すなわち、このバルク型光周波数コム発生器 18 では、入射端反射膜を介してバルク型光共振器 310 に入射された基本波としての光ビーム *Lin* に対して、マイクロ波信号に応じて光位相変調することができ、光ビーム *Lin* の位相を変調して、出射端反射膜を介して光周波数コム *Lout* を出射することができる。

このような構造の空洞マイクロ波共振器 320 では、空洞 323 を閉ループ状とすることにより、マイクロ波の漏れを抑えることができるとともに、共振モードを固定することができ、しかも、小型化することができる。またこのバルク型光周波数コム発生器 18 は、入射端 310A、出射端 310B の透過率を上述の如く設定することにより、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができ、光周波数コムを効率よく発生させることができる。

ちなみに、本発明に係る光周波数コム発生器は、バルク型光周波数コム発生器 10 へ適用される場合のみならず、例えば導波路型光周波数コム発生器 40 へ適用することも可能である。

図 23 は、導波路型光周波数コム発生器 40 の構成を示している。導波路型光周波数コム発生器 40 は、導波路型光変調器 400 から構成される。導波路型光変調器 400 は、基板 401 と、導波路 402 と、電極 403 と、入射側反射膜 404 と、出射側反射膜 405 と、発振器 406 とを備える。

基板 401 は、例えば引き上げ法により育成された 3～4 インチ径の *LiNbO₃* や *GaAs* 等の大型結晶をウェハ状に切り出したものである。この切り出した基板 401 上に導波路 402 層をエピタキシャル成長させたり、また加熱させた

基板上にTi拡散させて形成させるため、通常、機械研磨や化学研磨等の処理を施す。

導波路402は、光を伝搬させるために配されたものであり、導波路402を構成する層の屈折率は、基板等の他層よりも高く設定されている。導波路402に入射した光は、導波路402の境界面で全反射しながら伝搬する。

電極403は、例えばTiやPt、Au等の金属材料からなり、外部から供給された周波数 f_m の電気信号を導波路402に駆動入力する。導波路における光の伝搬方向と変調電界の進行方向は、この電極403を設けることにより同一となる。

入射側反射膜404及び出射側反射膜405は、導波路402に入射した光を共振させるため設けられたものであり、導波路402を通過する光を往復反射させることにより共振させる。発振器406は、電極403に接続され、周波数 f_m の電気信号を供給する。

入射側反射膜404は、導波路型光変調器400の光入射側に配され、図示しない光源から周波数 ν_1 の光が入射される。また、この入射側反射膜404は、出射側反射膜405により反射されて、かつ導波路402を通過した光を反射する。

出射側反射膜405は、導波路型光変調器400の光出射側に配され、導波路402を通過した光を反射する。またこの出射側反射膜405は、導波路402を通過した光を一定の割合で外部に出射する。

上述の構成からなる導波路型光周波数コム発生器40は、光が導波路402内を往復する時間に同期した電気信号を、電極403から導波路型光変調器400へ駆動入力されることにより、導波路402を1回だけ通過する場合に比べ、数十倍以上の深い位相変調をかけることが可能となる。これにより、導波路型光周波数コム発生器40は、バルク型光周波数コム発生器10と同様に、広帯域にわたるサイドバンドを有する光周波数コムを生成することができ、隣接したサイドバンドの周波数間隔は、全て入力された電気信号の周波数 f_m と同等になる。

導波路型光周波数コム発生器40を構成する入射側反射膜404の透過率は、上述した入射側反射鏡112の透過率と同様である。すなわち、入射側反射鏡404の透過率は、入射光の周波数 ν_1 において最大となるように設定されている。

これにより、光源から供給される周波数 ω_1 の光は、容易に入射側反射膜404を介して導波路402へ入射することができる。また、導波路402は、内部において共振する光に変調信号を駆動入力することにより、広帯域にわたり多数のサイドバンドが発生させることができる。また入射側反射膜404の透過率は、周波数 ω_1 以外の帯域において低く設定されているため、図4Bに示すとおり、発生した光周波数 ω_m の殆どのサイドバンドは、入射側反射膜404を介して外部に透過することはなく、導波路402内部において往復反射を繰り返すことになる。

すなわち、この導波路型光周波数コム発生器40は、入射光の周波数 ω_1 以外の帯域におけるサイドバンドの外部への透過を防止することができる。これにより、導波路型光周波数コム発生器40は、光損失を軽減でき、効率よく光周波数コムを生成することができる。加えて導波路型光周波数コム発生器40は、入射光の周波数 ω_1 において透過率は最大となり、入射時の光損失を軽減することができるため、更なる効率化を図ることができる。

導波路型光周波数コム発生器40を構成する出射側反射膜405の透過率は、出射側反射鏡113の透過率と同様である。すなわち、出射側反射鏡113の透過率は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

これにより本発明では、出射光の光強度の低下を防ぎつつ、発生したサイドバンドの平坦化を図ることができる。

すなわち、本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器40は、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができるため、入射光の周波数と相当周波数差のある帯域においても、高精度に被測定光の周波数を測定することができる。また、この導波路型光周波数コム発生器40は、各帯域において均一かつ光強度の高いサイドバンドを多数生成させることができるため、例えば、波長多重通信方式における光送信装置に適用することにより、波長の異なる多数の光を生成し、当該生成した光を搬送波として変調をかけて光変調信号を作り出し、これらを多重化して送信することも可能となる。

なお、本発明は、入射側反射膜404及び出射側反射膜405それぞれについ

て上述した透過率が設定されている場合のみならず、例えば入射側反射膜404のみ、或いは出射側反射膜405のみに対して、上述した透過率を設定してもよいことは勿論である。

更に、この導波路型光周波数コム発生器40は、バルク結晶を用いるバルク型光周波数コム発生器10と比較して、小型化を図ることができ、寄生容量や寄生インダクタンスを抑えることが可能となる。これにより、導波路型光周波数コム発生器40は、印加電圧を低減できることから、デバイスの高速化を図ることができ、また他の超高速光デバイスとの集積化も可能となる。

本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器40は、更に以下に説明する構成を採用することも可能である。

図24は、ファブリペロー共振した光が入射される導波路型光周波数コム発生器50の入射側結合系4の側面図を示している。この入射側結合系4は、光ファイバコア602から光を出射する光ファイバ60と、導波路型光周波数コム発生器50から構成される。またこの入射側結合系4において、光ファイバコア602から出射された光は、導波路型光周波数コム発生器50における入射側反射膜501と、光ファイバ60の端面に施されたファイバ反射膜601との間でファブリペロー共振する。すなわち、この入射側反射膜501とファイバ反射膜601とのギャップの長さ、光の周波数から求まる共振条件を満たした光のみが入射側反射膜501を透過し、導波路402へ高効率で入射結合できる。

図25A及び図25Bは、入射側反射膜501とファイバ反射膜601間のギャップに対する、周波数 ν_1 の入射光の入射側反射膜501における反射率、透過率の関係を示している。このギャップを変化させることにより周波数 ν_1 における共振条件を満たすと、反射率が低くなり、透過率が高くなる。すなわち本発明では、共振条件を満たし、光の群速度に対応する長さにギャップを制御すれば、周波数 ν_1 の入射光のみ入射側反射膜501を効率よく透過させることが可能となる。

なお、このギャップの長さは、なるべく短い方が望ましく、またギャップの光路長は、ギャップ部に接着剤等を充填する場合も含めて、波長の10倍程度に制御することが望ましい。

図26A及び図26Bは、入射側反射膜501とファイバ反射膜601との間

のギャップの長さが a であるとき、入射側反射膜 501 における、各周波数に対する反射率、透過率の関係を示している。周波数 ν_1 以外の帯域は、透過率が低く、反射率が高くなるため、発生したサイドバンドの外部透過を防止することができる。これにより本発明は、導波路型光周波数コム発生器 50 内に光を効率よく閉じ込めることができ、光損失を軽減することができる。

なお、入射側反射膜 501 において設定されている反射率は、入射光の周波数 ν_1 において最小となるように設定されている場合のみならず、全ての周波数帯域において自由に設定しても本発明の効果を得ることは可能である。なお、全ての周波数帯域において反射率が 100% に漸近する場合に、 ν_1 以外の帯域において発生したサイドバンドを最も効率よく反射させて導波路型光周波数コム発生器 50 内部に閉じ込めることができる。

本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器 40 は、更に以下に説明する導波路型光周波数コム発生器 60 に応用することができる。

この導波路型光周波数コム発生器 60 は、図 27 に示すように、導波路型光変調器 650 と、入射側光ファイバ 660 と、出射側光ファイバ 670 から構成される。なお、上述の導波路型光周波数コム発生器 40 と同一の構成要素、部材は、同一の番号を付して説明を省略する。

導波路型光変調器 650 は、基板 401 と、導波路 402 と、クラッド層 613 と、電極 614 とを備える。

電極 614 は、クラッド層 613 上に設けられ、例えば Al や Cu、Pt、Au 等の金属材料からなり、発振器から供給された周波数 f_m の電気信号を導波路 402 に駆動入力する。

導波路 402 において、光が入射する側の端面（以下、端面 A と称する）と、光が出射させる側の端面（以下、端面 B と称する）については、導波路型光共振器 1 をウエハから切り出し後に、表面粗さを低減させるべく（望ましくは、使用波長が λ のときに、約 $\lambda/20$ になるように）、例えば機械研磨や化学研磨等が施される。さらに、この端面 A、B は、導波路 12 に対して垂直となるように（望ましくは、誤差が $\pm 0.1^\circ$ 以下になるように）調整が施される。

入射側光ファイバ 660 は、クラッド 721 の内側に形成されたコア 722 を

通じて光を伝搬させる。また、この入射側光ファイバ660は、端面に形成された誘電体多層膜723を介して導波路402へ光を出射する。誘電体多層膜723表面は、端面Aに突き当てたときに散乱が生じない程度まで（例えば、使用波長 λ に対して約 $\lambda/20$ になるように）研磨等が施され、表面粗さを低減させる。

出射側光ファイバ670は、端面に形成された誘電体多層膜733を介して、導波路402から光が入射される。出射側光ファイバ670は、導波路402から入射された光を、クラッド731内側に形成されたコア732を通じて伝播する。なお、誘電体多層膜733表面は、誘電体多層膜723と同程度まで研磨が施される。

この入射側光ファイバ660、出射側光ファイバ670は、図28に示される入射側の例の如く、夫々ファイバ先端を凸状に研磨して仕上げ、最後に各誘電体多層膜723、724を被覆してもよい。これにより、入射側光ファイバ660及び出射側光ファイバ670の端面A、Bに対する突き当てが容易になる。また本発明は、この凸面を導波路上に設けることも可能である。

ちなみに、この入射側光ファイバ660及び出射側光ファイバ670は、誘電体多層膜723、733表面が、端面A、Bに対して完全に突き当たるよう固定される。すなわち、各光ファイバ660、670と、導波路402との光結合系は、非球面レンズを介さずに直接的に光を入出射させる構成となる。

誘電体多層膜723、733を構成する各層の厚さは、使用波長 λ に対して、約 $\lambda/4$ であり、屈折率が大小異なる薄膜を交互に重ねて蒸着することにより構成する。この誘電体多層膜723、733は、反射する光の波長に応じて、屈折率の異なる材料を交互に積層することにより、所望の透過率に制御することができる。ちなみに、本発明において、この誘電体多層膜723の透過率は、上述した入射側反射鏡112の透過率と同様である。すなわち、誘電体多層膜723の透過率は、入射光の周波数 ν_1 において最大となるように設定されている。誘電体多層膜733の透過率は、出射側反射鏡113の透過率と同様である。すなわち誘電体多層膜733の透過率は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定する。

次に、入射側光ファイバ660及び出射側光ファイバ670先端の形状につい

て説明する。

図29は、誘電体多層膜723が形成された入射側光ファイバ660の先端の形状を示している。この図29に示す例は、クラッド721の直径が約125 μ mであり、コア722の直径が約3~5 μ mである。また、コア722を中心に伝搬する光のビーム径は、約10 μ m程度である。

すなわち、誘電体多層膜723におけるコア722周辺は、厚いクラッド721に包み込まれているため、外部からの損傷を受けにくい設計となっている。特に傷や損傷、内部応力による歪みは、図30に示すように誘電体多層膜723の角部分に生じやすい。しかしながら、厚いクラッド721によりコア層をカバーする誘電体多層膜723は、この角部分において数十 μ mの剥がれが生じて、コア722周辺は殆ど影響を受けない。

このように本発明は、コア722周辺において、損傷による影響を殆ど受けない誘電体多層膜723、733を導波路402両端から突き当てることにより、導波路402から光が漏洩することがなくなるため光損失を軽減でき、導波路型光周波数コム発生器60全体のフィネスを向上させることができる。

すなわち、本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器60は、導波路402内部を伝搬する光を、導波路402両端にそれぞれ配された入射側光ファイバ660の誘電体多層膜723と、出射側ファイバ670の先端に形成された誘電体多層膜733により共振させる。これにより、本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器60は、損傷による影響を殆ど受けない誘電体多層膜723、733により光を往復反射させることができるため、光を漏洩させることなくフィネスを向上させることができる。また、この導波路型光周波数コム発生器60は、誘電体多層膜723、733の透過率を上述の如く設定することにより、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができる。

本発明を適用した導波路型光周波数コム発生器40は、更に以下に説明する導波路型光周波数コム発生器80に応用することができる。

この導波路型光周波数コム発生器80は、図31に示すように、導波路型光変調器800から構成される。この導波路型光変調器800は、基板401と、導

波路 402 と、バッファ層 813 と、入射側反射膜 404 と、出射側反射膜 405 と、電極 816 と、給電部 817 と、発振部 818 とを備える。なお、上述の導波路型光周波数コム発生器 40 と同一の構成要素、部材は、同一の番号を付して説明を省略する。

電極 816 は、導波路 402 を伝搬する光に対して、位相変調をかけるべくバッファ層の上部に配されるものであり、例えばコプレーナストリップ等のマイクロストリップ線路構造からなる。本発明では、このマイクロストリップ線路からなる電極 816 に対して、発振部 818 から発振されたマイクロ波を、例えば同軸ケーブルからなる給電部 817 を介して給電することにより、電極 816 の下部において電圧と電極幅に応じた電界を発生させることができる。この発生された電界は、導波路 402 の屈折率を変化させるため、導波路 402 内を共振する光の位相を変調させることが可能となる。

なお導波路 402 を構成する結晶を長い領域にわたり利用した方が高い変調効率を得ることができるため、電極 816 は、導波路 402 と平行するように、また導波路 402 の長さに合致するように延長させられる。また電極 816 は、図 31 に示すように幅の広い領域（以下、この領域を広幅領域 816a と称する）と、幅の狭い領域（以下、この領域を狭幅領域 816b と称する）を有する。ちなみに広幅領域は、A-A' 断面図の例において、導波路の幅よりも広く設定され、例えば幅約 100 μm のサイズからなる。また狭幅領域 816b は、導波路の幅とほぼ等しい長さに設定され、幅約 10 μm のサイズからなる。

このように本発明は、広幅領域 816a と狭幅領域 816b を交互に設けることにより、電極 816 自身の電気抵抗を各領域毎に変化させることができる。特に本発明は、図 31 に示す例のように、広幅領域 816a の電極幅を狭幅領域 816b の電極幅の 10 倍とすれば、抵抗を 1/10 に減少させることができる。

次に、上述した広幅領域 816a 及び狭幅領域 816b からなる電極 816 内を伝搬するマイクロ波の損失について説明する。図 32 は、電極 816 内を伝搬するマイクロ波の損失等について示している。

この図 32 において、給電部 817 による給電の影響は、電極の電圧分布、電流分布、電界分布、抵抗損失分布に対して無視できるものとする。また電極 81

6の両端は開放されているものとし、長さ L の電極816に対して、電極816内を伝搬するマイクロ波の波長 λ が $2L = N\lambda$ の関係を満たす場合に共振状態となるものとする。更に変調効率が高い場合を想定して計算を行うために、電極816内を伝搬するマイクロ波の速度と、導波路402内部を伝搬する光の速度は、等しいものとする。また電極816全体の特性インピーダンス、マイクロ波速度は、狭幅領域のみから構成される従来の導波路型光変調器の電極と同様になるように、すなわちマイクロ波が共振している状態となるように、電極間隔が調整される。

ここで、光の入射側反射膜からの距離を x とし、マイクロ波の波長 λ が電極816の長さ L と等しい場合を想定するために N を2とした。更に最大電圧を V_0 としたとき、図32Aに示す電圧 V の分布は、 $V = V_0 \cos(2\pi x/L) \sin(\omega t)$ で表される（ちなみに、時間変化を表す $\sin(\omega t)$ の成分は1とする）。すなわち電極816全体の特性インピーダンス、マイクロ波速度は、狭幅領域のみから構成される電極と同様であるものと仮定しているため、電圧分布は、従来の導波路型光変調器と同様な傾向となる。

また電極816における電流 I の分布は、図32Cに示すように、 $I = I_0 \cos(2\pi x/L) \sin(\omega t + \phi)$ で表される。ここで I_0 は、電極816における特性インピーダンス Z で決定される因子であり $I_0 = V_0/Z$ で表され、 ϕ は電流と電圧の位相差である。この図32Cに示す電流分布は、電圧の傾向に依存するため、従来の導波路型光変調器と同様の傾向となる。なお、この図32に示す電圧分布、電流分布とも共振状態を前提に計算しているため、実際にはそれぞれ極性反転した電圧 V 、電流 I が分布している状態となる。

また電流が最も流れている $x = L/4$ 、 $3L/4$ 付近の領域は、印加されている電圧は低い。このため、当該領域の変調を犠牲にして電流損失を低減しても、換言すれば当該領域における変調効率が低下しても、全体の変調効率に対する影響を軽減させることが可能となる。従って本発明は、 $x = L/4$ 、 $3L/4$ 付近の領域を、広幅領域とする。これにより本発明は、電流抵抗を軽減させることができるため、マイクロ波の損失を低減させることができる。

ちなみに電極816上の抵抗損失 L_s は、電流の2乗に比例し、 $L_s = L_{s0} C$

$\cos(2\pi x/L)^2$ で表される。ここで $L s_0 = R I^2 / 2$ であり、 R を電極816の単位長さ当りの電気抵抗としたとき、狭幅領域816bの10倍の電極幅からなる広幅領域816aのマイクロ波損失は、図32Dのように表される。広幅領域816aを設けることにより電流抵抗を低減させた結果、本発明は、図32Dに示されるように、マイクロ波の半波長 $\lambda/2$ に一致した周期で、マイクロ波損失(Loss/Loss0)を大きく低減させることができる。

また電極816の幅を広くとることにより、単位面積当りの電気力線の数が増加するため、図32Bに示すように広幅領域816aにおいて電界が小さくなる。すなわち、マイクロ波の損失を低減できる一方で、マイクロ波により電極816を介して発生する電界を下げてしまい、その結果変調効率を低下させる原因ともなる。

図33は、電極816に印加される電圧が一定であると仮定した場合における、電極816上のマイクロ波損失と、変調効率の変化について計算した結果を示している。この図33において、横軸 B/L は、広幅領域816aの長さ B の、抵抗816全体の長さ L に対する割合を示している。広幅領域816aの割合を増加させるに伴い、電気抵抗の低下によるマイクロ波損失は減少し、また図32Bに示すように電界強度も局所的に低下することから変調効率についても減少する。しかしながら、変調効率の減少の割合は、マイクロ波損失の減少の割合よりも緩やかである。これは、広幅領域816aを設けることにより、変調効率の減少割合を低く抑えつつ、マイクロ波損失を減少させることができることを示唆している。

また図34は、投入電力を導波路型光変調器800内部で全て消費させられるように、電極816全体の特性インピーダンスを制御する場合を仮定し、更に簡単のためマイクロ波の損失が全て電極816の抵抗によるものと仮定して、変調効率を計算した結果を示している。この電力一定の場合における変調効率を示した図34において、 B/L の値が約0.65の場合に変調効率が最大1.8となることが分かる。これは、電圧で規格化した場合において、変調効率は減少するが、導波路型光変調器1全体に投入される電力で規格化した場合において、変調効率は高くなることを示唆するものである。なお、この変調効率の最大値は、広幅領

域 8 1 6 a や狭幅領域 8 1 6 b の幅を調整することにより、さらに改善できることは勿論である。

以上詳細に説明したように、本発明に係る導波路型光変調器 8 0 0 は、電流抵抗を低減させた広幅領域 8 1 6 a を有する電極 8 1 6 を介して、変調電界を印加することができるため、マイクロ波の損失を軽減することができる。またマイクロ波の波長に応じて広幅領域 8 1 6 a 及び狭幅領域 8 1 6 b の位置を制御することにより、マイクロ波の損失を軽減しつつ、さらに変調効率の低下をも抑えることが可能となり、電力規格化した場合には変調効率を改善することができる。またマイクロ波の波長 λ が電極の長さ L と等しい場合以外も、マイクロ波の半波長 $\lambda/2$ に合わせた周期で、広幅領域を複数個設けることにより、マイクロ波の損失を抑えることが可能となる。

すなわち、本発明を適用した導波路型光変調器 8 0 0 は、超伝導材を電極の材料として使用せずとも、通常の Au 等の金属電極を用いることにより、マイクロ波の損失を軽減し、高い変調効率を担保できる。また導波路 4 0 2 を構成する結晶を長い領域にわたり利用することで高い変調効率を期待する場合においても、複数の給電部 8 1 7 を設けることなく、広幅領域 8 1 6 a を設けることでマイクロ波の損失を軽減させることができる。このため、本発明を適用した導波路型光変調器 8 0 0 は、回路構成が複雑化するという問題点をも改善することが可能となる。

さらにこの導波路型光変調器 8 0 0 は、入射側反射膜 4 0 4 及び出射側反射膜 4 0 5 それぞれについて上述した透過率が設定されている。このため、この導波路型光変調器 8 0 0 から構成される導波路型光周波数コム発生器 8 0 は、生成するサイドバンドにおける光強度分布の平坦化を図りつつ、光損失を極力抑えることができる。

なお本発明は、上述した実施の形態に限定されるものではない。広幅領域 8 1 6 a の電極幅は、狭幅領域 8 1 6 b の電極幅の 1 0 倍である場合のみならず、何倍であっても良い。また、広幅領域 8 1 6 a の形状も実施の形態に限定されるものではなく、テーパ等を設けることにより対処しても良い。また、広幅領域 8 1 6 a を制御する場合のみならず、例えば狭幅領域 8 1 6 b の形状を制御すること

により、同一の効果を目指す構成も含まれる。

また本発明に適用する電極の構造は、光位相変調器に対して適用可能であり、また光強度変調器に対しても適用可能である。また本発明では、構成上電極 8 1 6 の幅を変えた広幅領域 8 1 6 a 及び狭幅領域 8 1 6 b を設けることにより、マイクロ波の損失を抑えているが、電極 8 1 6 の幅ではなく厚さを変えることによっても、同一の効果を期待できる。

なお本発明を適用した導波路型光変調器 8 0 0 は、更に図 3 5 に示すような電極 8 1 6 の構成を採用してもよいことは勿論である。なお、この図 3 5 において、給電部 8 1 7 は省略する。

図 3 5 A は、電極 8 1 6 の周囲に配していたグラウンドを、基板 4 0 1 の底部に設けるようにしたものである。また図 3 5 B に示す例は、2 電極のコプレーナ線路を用いた場合である。更に図 3 5 C に示す例は、電極 8 1 6 として、コプレーナストリップ線路を用いた場合である。また、図 3 5 D に示す例は、電極 8 1 6 としてメッシュの付いたスロットラインを用いた場合である。メッシュの付いたスロットラインでは、電極間隔を狭く維持しながら、静電容量を減少させることができるが、メッシュ部分の抵抗が逆に大きくなってしまう。このため、高電流の領域ではメッシュ部分を割愛し、電極間隔を大きくすることで対処する。

請求の範囲

1. 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、上記入射側反射鏡と上記出射側反射鏡との間に配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記出射側反射鏡は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定することを特徴とする光周波数コム発生器。

2. 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、上記入射側反射鏡と上記出射側反射鏡との間に配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記入射側反射鏡は、上記入射された光の周波数において最大の透過率を有することを特徴とする光周波数コム発生器。

3. 生成された上記サイドバンドが上記出射側反射鏡を介して入射されるフィルタを備え、

上記フィルタは、上記入射された光の周波数において最小の透過率を有することを特徴とする請求の範囲第2項記載の光周波数コム発生器。

4. 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、上記入射側反射鏡と上記出射側反射鏡との間に配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記入射側反射鏡は、上記入射された光の周波数において最大の透過率を有し、

上記出射側反射鏡は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定することを特徴とする光周波数コム発生器。

5. 上記出射側反射鏡は、周波数に対する、生成したサイドバンドの光強度の変化率に基づき、各周波数毎に透過率を設定することを特徴とする請求の範囲第4項記載の光周波数コム発生器。

6. 上記光変調手段は、電界を印加することにより屈折率が変化するバルク結晶であることを特徴とする請求の範囲第4項記載の光周波数コム発生器。

7. 上記入射側反射鏡は、上記光変調手段の入射側に形成された高反射膜であり、上記出射側反射鏡は、上記光変調手段の出射側に配置され、電気機械変換素子により移動される高反射膜の形成された可動ミラーであることを特徴とする請求の範囲第6項記載の光周波数コム発生器。

8. 上記光変調手段を内蔵する空洞変調信号共振器とを備え、

上記空洞変調信号共振器の変調信号に共振する空洞をコ字状に形成し、上記光変調器の前後の空洞長を共振周波数の波長の $1/4$ にしたことを特徴とする請求の範囲第6項記載の光周波数コム発生器。

9. 上記光変調手段を内蔵する空洞変調信号共振器とを備え、

上記空洞変調信号共振器の変調信号に共振する空洞を閉ループ状に形成したことを特徴とする請求の範囲第6項記載の光周波数コム発生器。

10. 上記光変調手段は、光を伝搬させる導波路であることを特徴とする請求の範囲第4項記載の光周波数コム発生器。

11. 上記入射側反射鏡及び上記出射側反射鏡は、上記光変調手段の入射側端面及び／又は出射側端面に形成された反射膜であることを特徴とする請求の範囲第10項記載の光周波数コム発生器。

12. 上記入射側反射鏡は、上記共振手段へ光を送信する入射側光ファイバの端面に形成された反射膜であり、上記出射側反射鏡は、上記光変調手段により生成されたサイドバンドを受信する出射側光ファイバの端面に形成された反射膜であることを特徴とする請求の範囲第10項記載の光周波数コム発生器。

13. 上記入射側光ファイバの端面及び／又は上記出射側光ファイバの端面を、上記光導波路の端面に接触させて構成することを特徴とする請求の範囲第12項

記載の光周波数コム発生器。

14. 上記反射膜は、互いに屈折率が異なる材料を交互に積層した誘電体多層膜であることを特徴とする請求の範囲第12項記載の光周波数コム発生器。

15. 上記入射された光は、端面に反射膜を形成した光ファイバから出射され、当該反射膜と入射側端面に形成された反射膜との間で共振された光であることを特徴とする請求の範囲第10項記載の光周波数コム発生器。

16. 上記光変調手段と平行するように配され、広幅領域と狭幅領域からなり、上記発振手段から発振された変調信号に基づき上記光変調手段に電界を印加するための電極を備え、

上記電極は、上記発振手段から発振された上記変調信号の半波長に合わせた周期で、上記広幅領域を設けることを特徴とする請求の範囲第10項記載の光周波数コム発生器。

17. 上記光変調手段は、上記共振手段において共振された光の位相を上記変調信号の波長に応じて変調することを特徴とする請求の範囲第16項記載の光周波数コム発生器。

18. 上記電極において、大電流が流れ、かつ低電圧が印加されている領域に、上記広幅領域を設けることを特徴とする請求の範囲第16項記載の光周波数コム発生器。

請求の範囲

[2002年11月20日(20.11.02)国際事務局受理:出願当初の請求の範囲2は補正された;他の請求の範囲は変更なし。(2頁)]

1. 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、上記入射側反射鏡と上記出射側反射鏡との間に配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記出射側反射鏡は、生成したサイドバンドの光強度に応じて、各周波数毎に透過率を設定することを特徴とする光周波数コム発生器。

2. (補正後) 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射膜及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射膜を介して入射された光を共振させる共振手段と、入射端側に上記入射側反射膜が形成され、出射端側に上記出射側反射鏡が配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記入射側反射膜は、上記入射された光の周波数において最大の透過率を有することを特徴とする光周波数コム発生器。

3. 生成された上記サイドバンドが上記出射側反射鏡を介して入射されるフィルタを備え、

上記フィルタは、上記入射された光の周波数において最小の透過率を有することを特徴とする請求の範囲第2項記載の光周波数コム発生器。

4. 所定の周波数の変調信号を発振する発振手段と、互いに平行な入射側反射鏡及び出射側反射鏡から構成され、入射側反射鏡を介して入射された光を共振させる共振手段と、上記入射側反射鏡と上記出射側反射鏡との間に配され、上記発振手段から供給された上記変調信号に応じて上記共振手段において共振された光の位相を変調し、上記入射された光の周波数を中心としたサイドバンドを上記変調信号の周波数の間隔で生成する光変調手段とを備え、

上記入射側反射鏡は、上記入射された光の周波数において最大の透過率を有し、

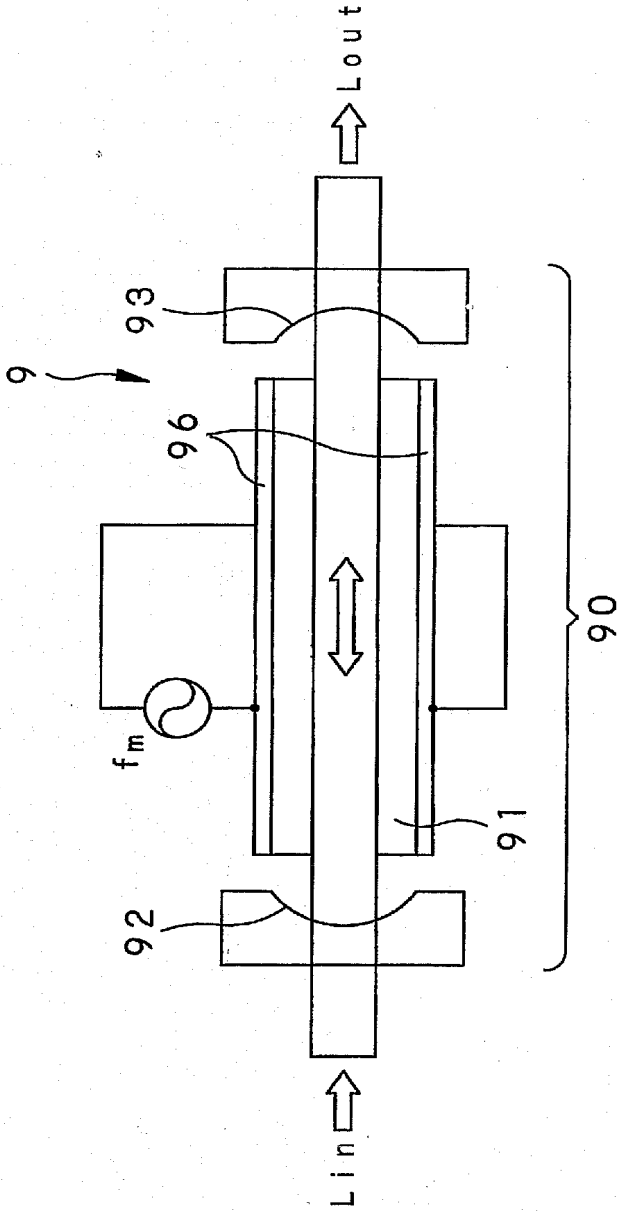
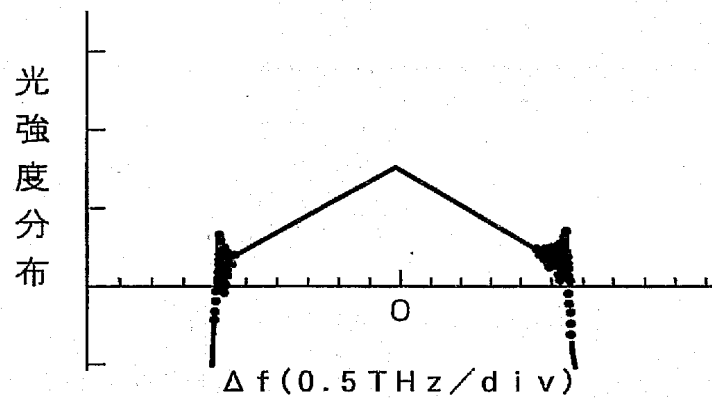


Fig. 1

2/27



F i g . 2

3/27

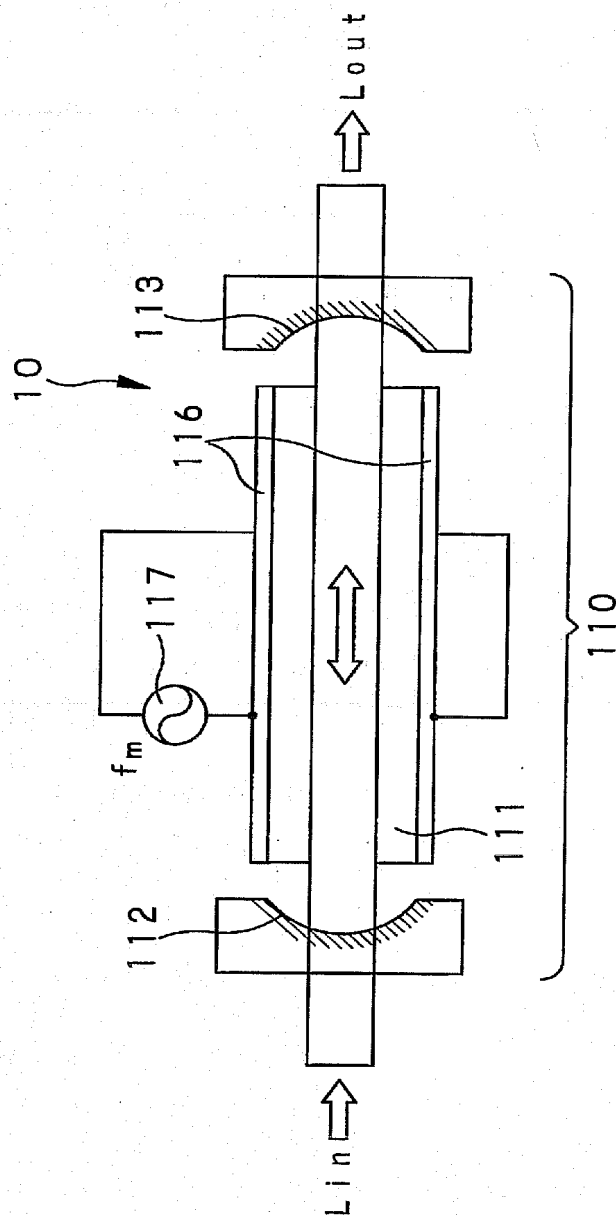


Fig. 3

4/27

Fig. 4 A

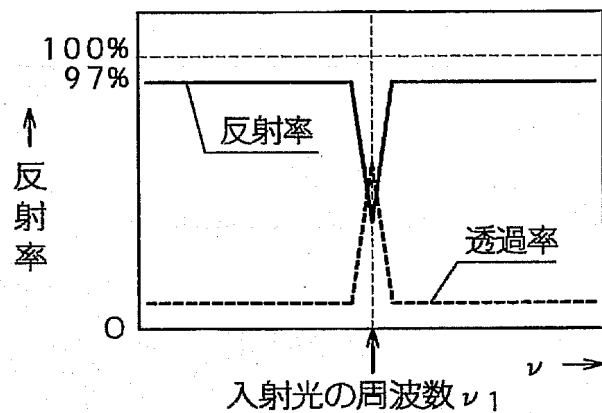


Fig. 4 B

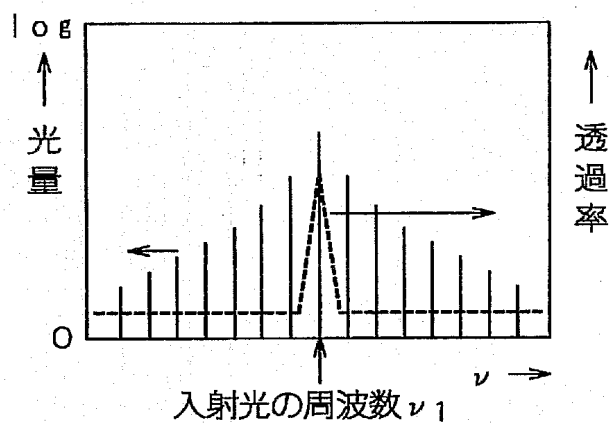
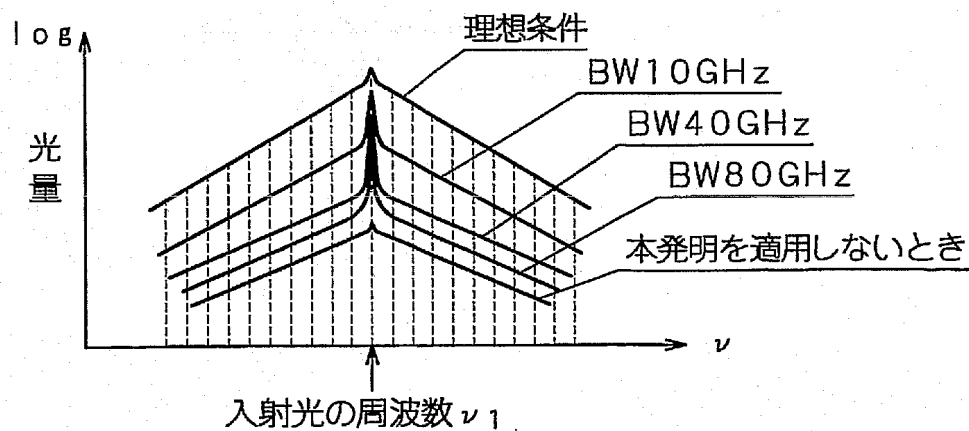


Fig. 4 C



5/27

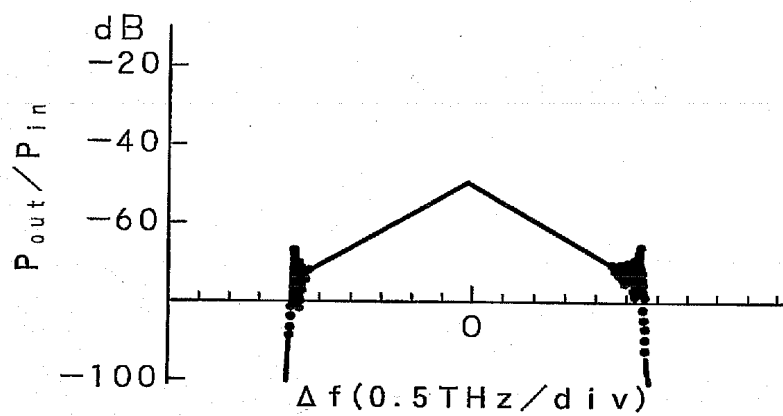


Fig. 5

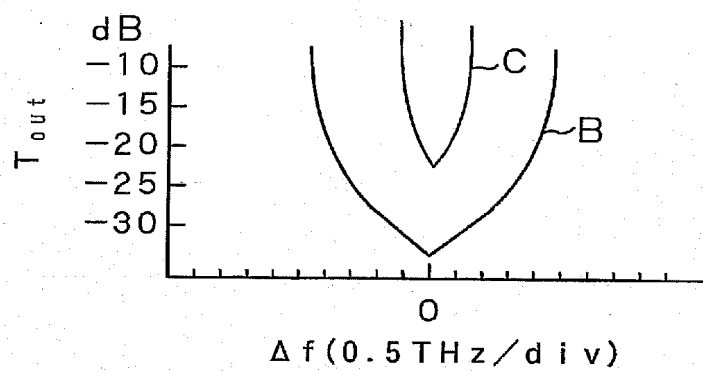


Fig. 6

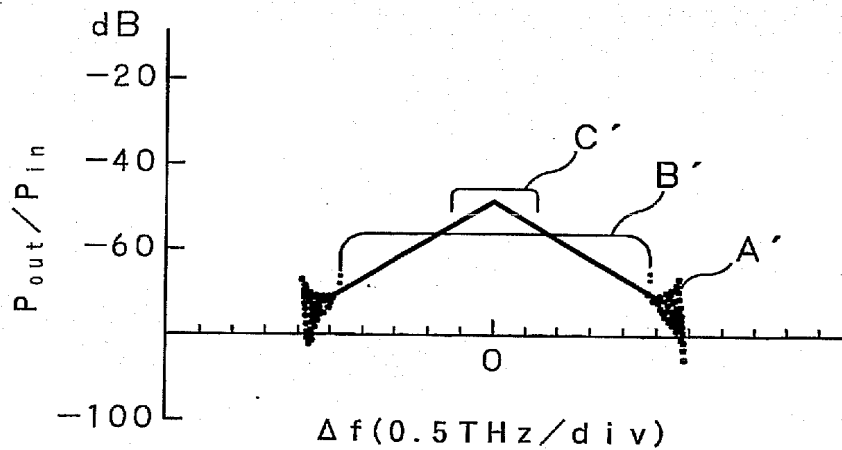
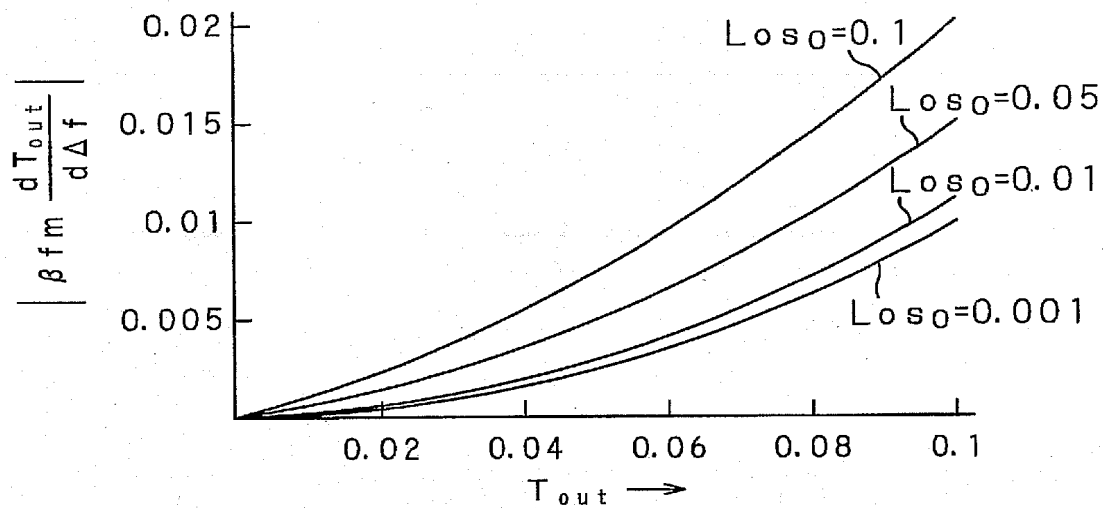
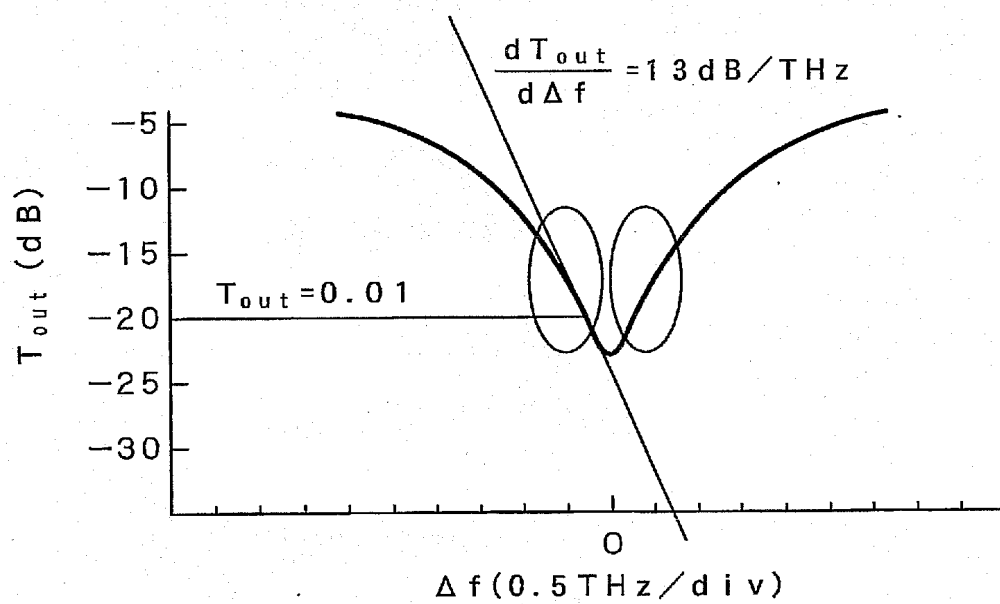


Fig. 7

6/27

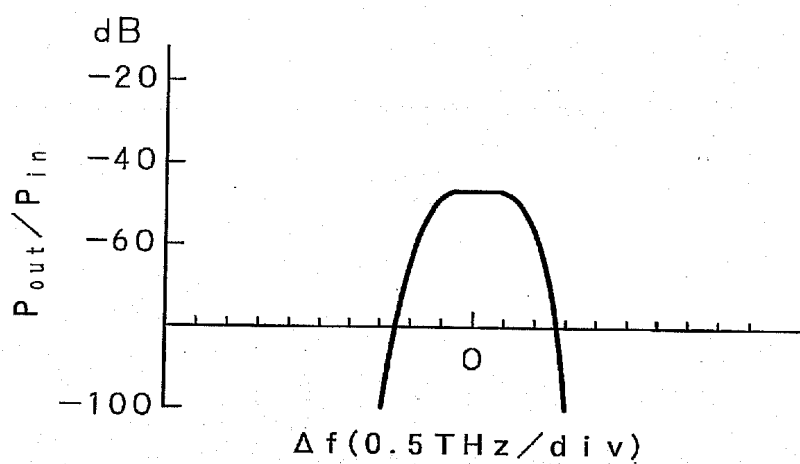


F i g . 8



F i g . 9

7/27



F i g . 1 0

8/27

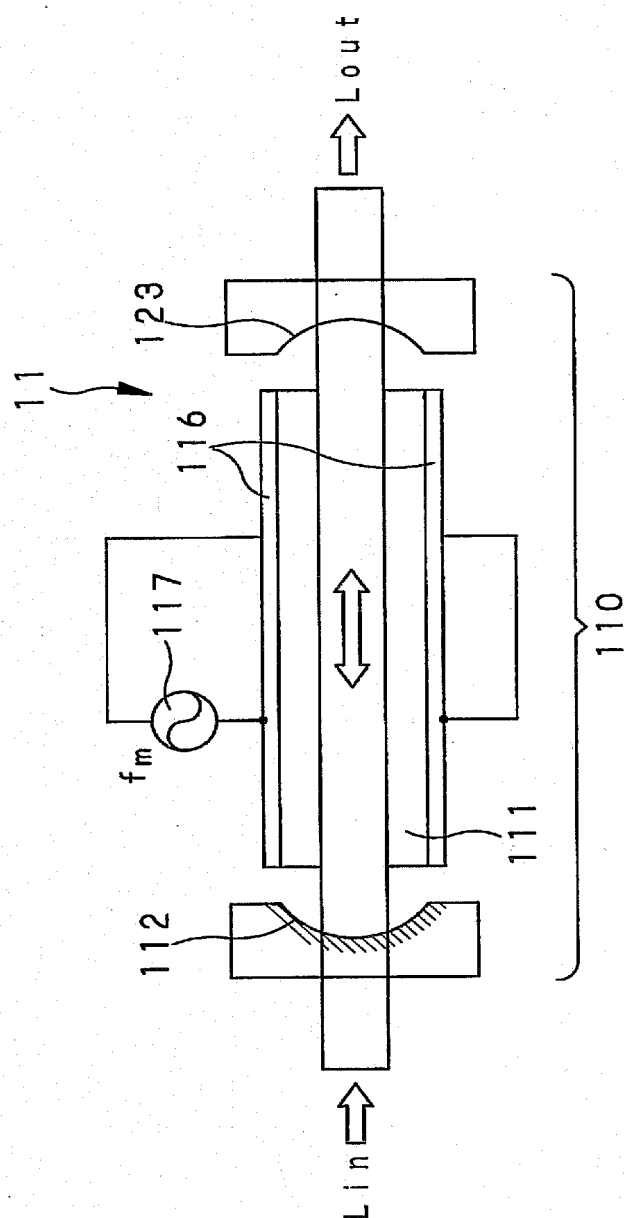
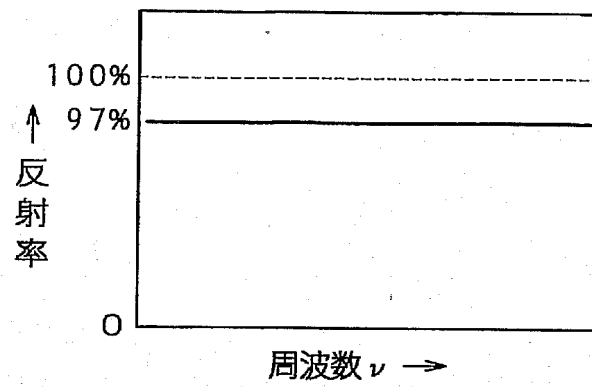


Fig. 11

9/27



F i g . 1 2

10/27

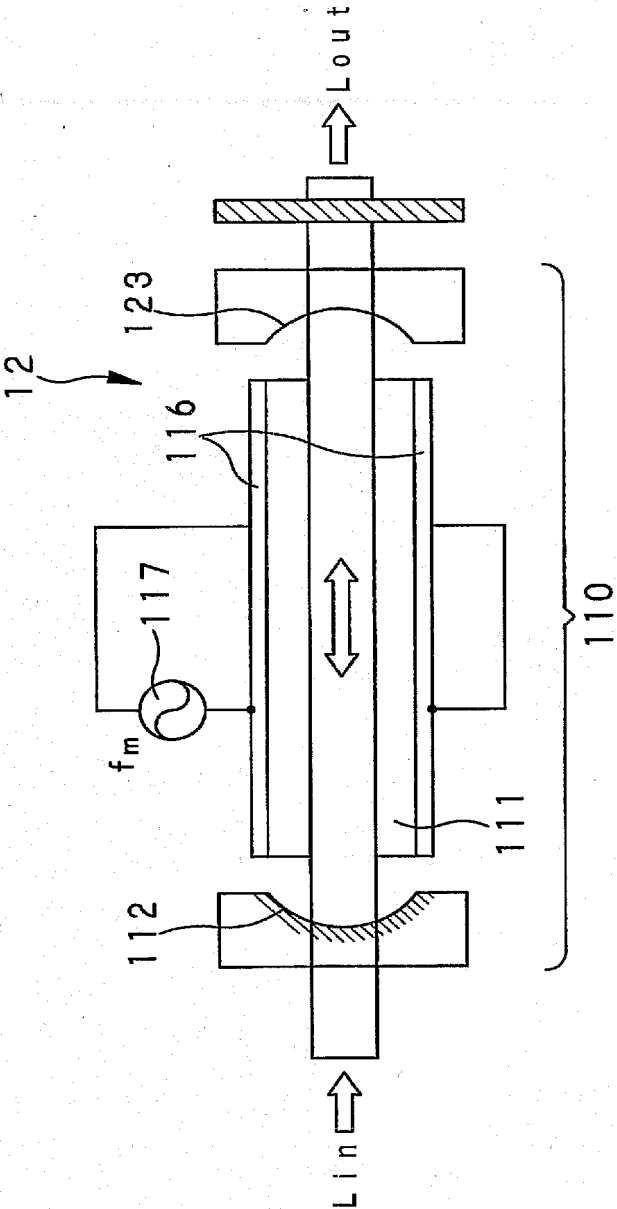
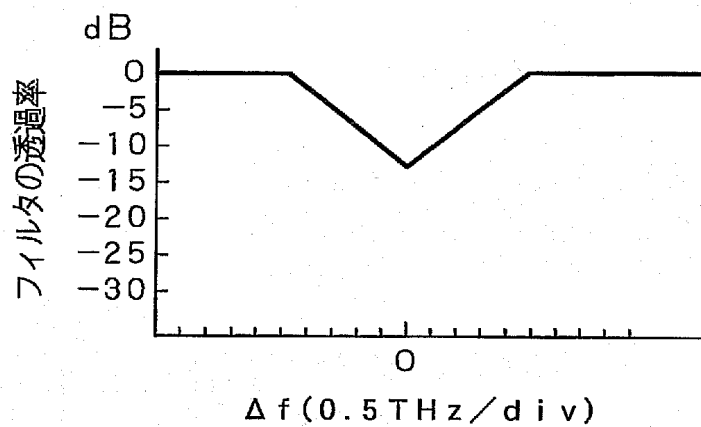
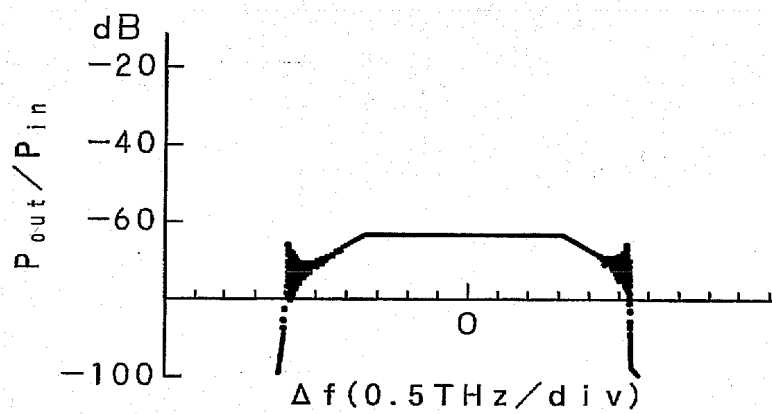


Fig. 13

11/27



F i g . 1 4



F i g . 1 5

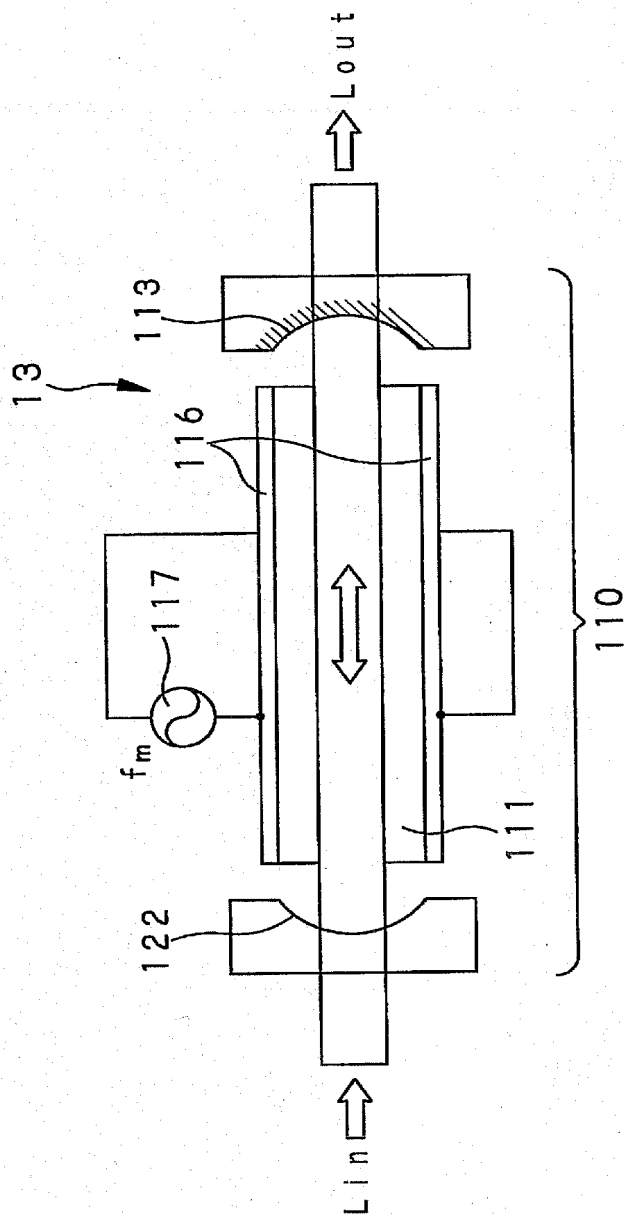


Fig. 16

13/27

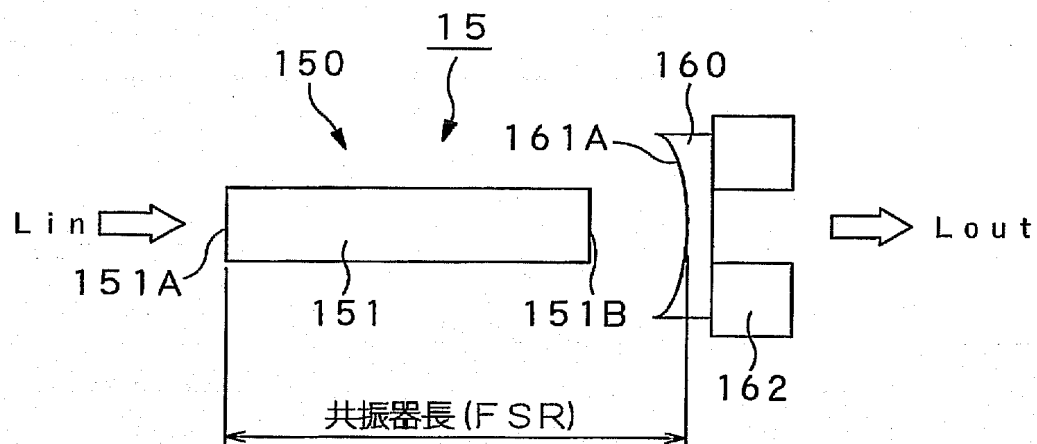


Fig. 17

14/27

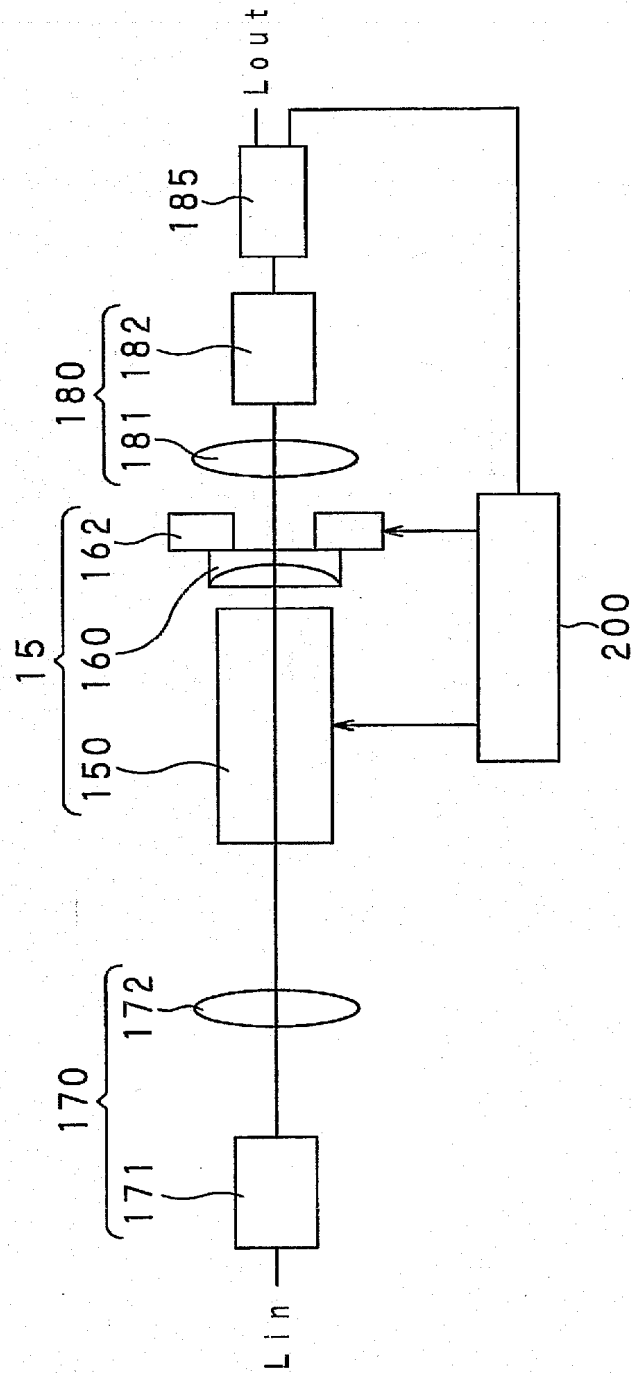
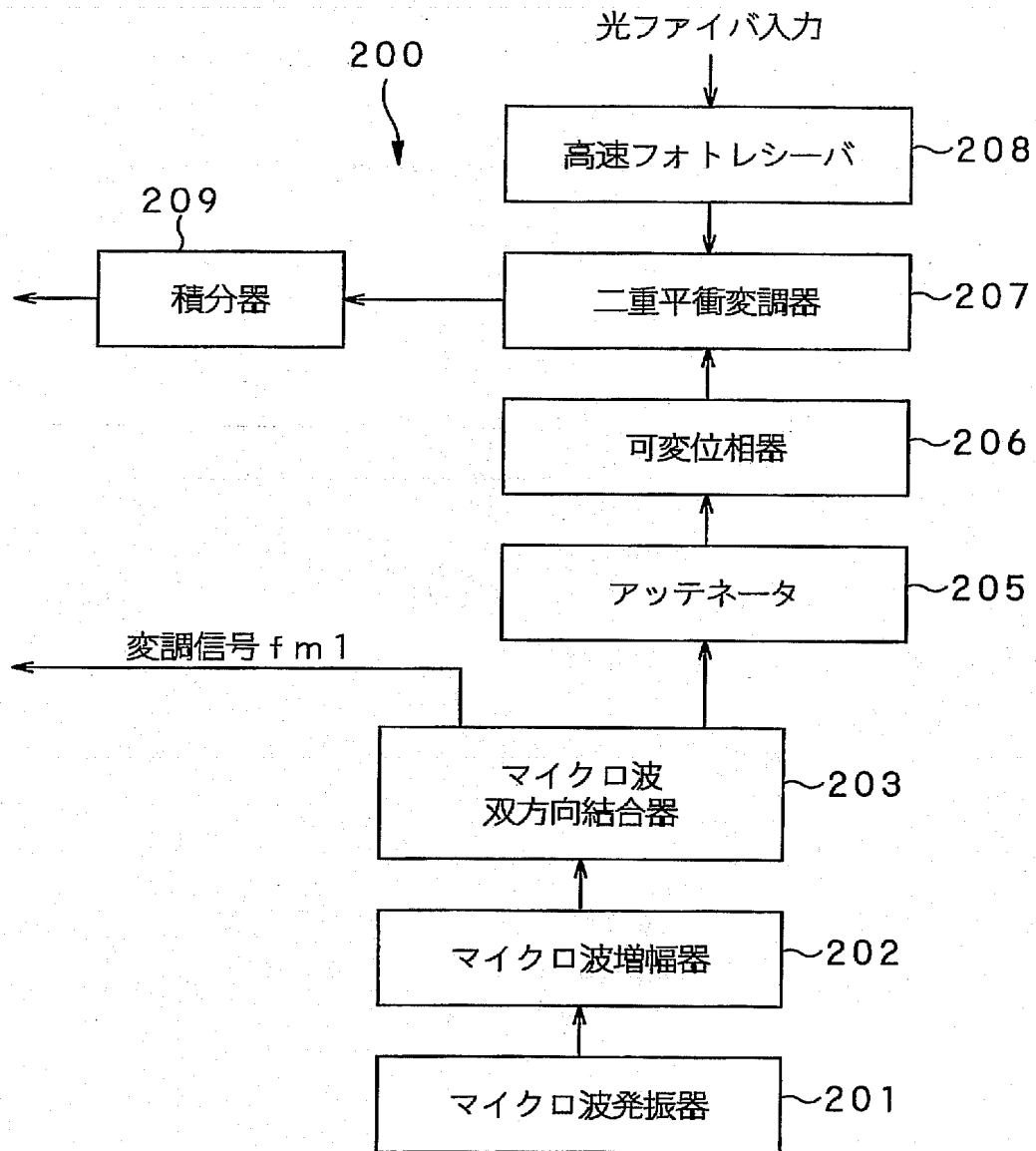


Fig. 18

15/27



F i g . 1 9

16/27

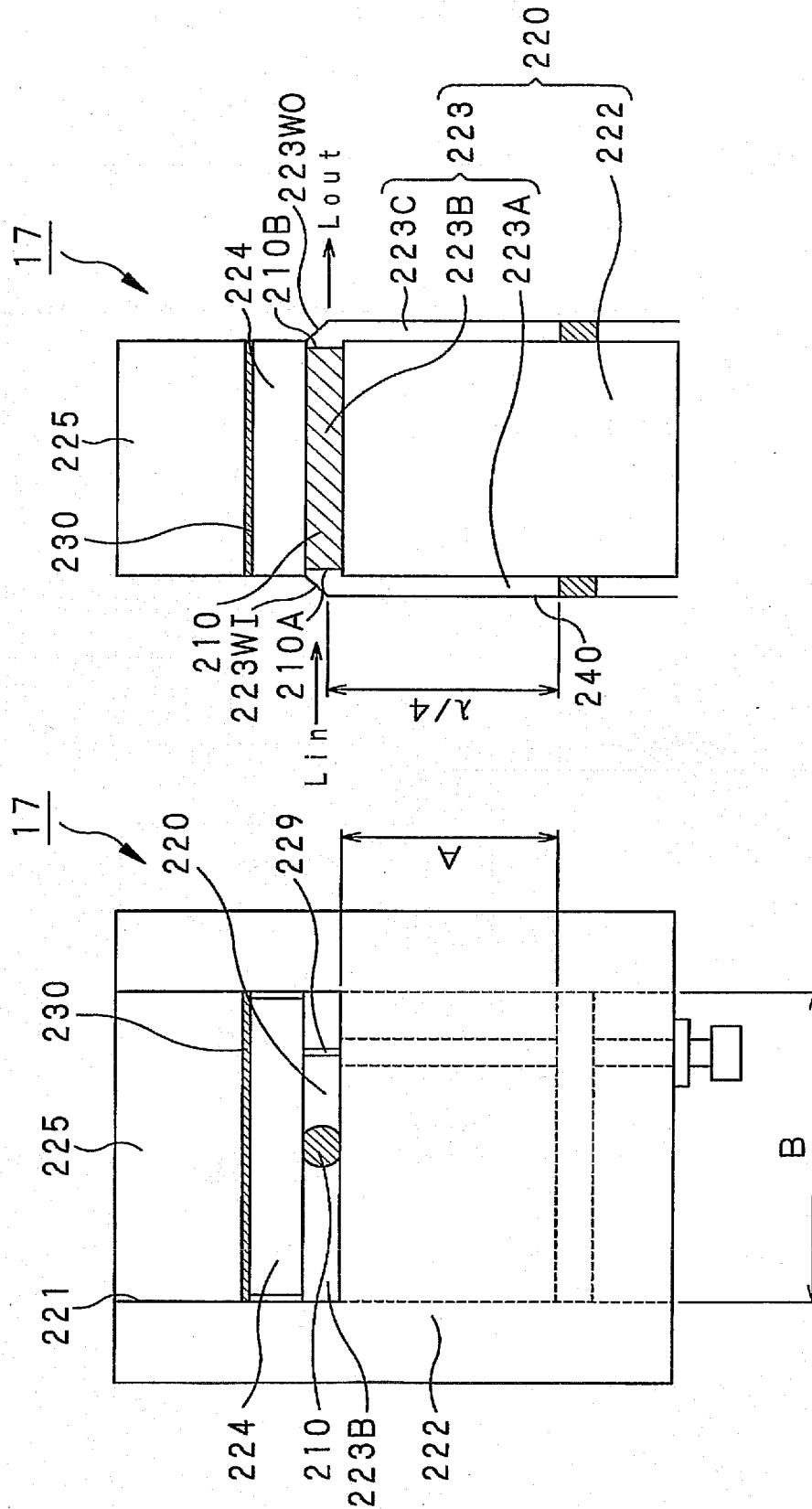
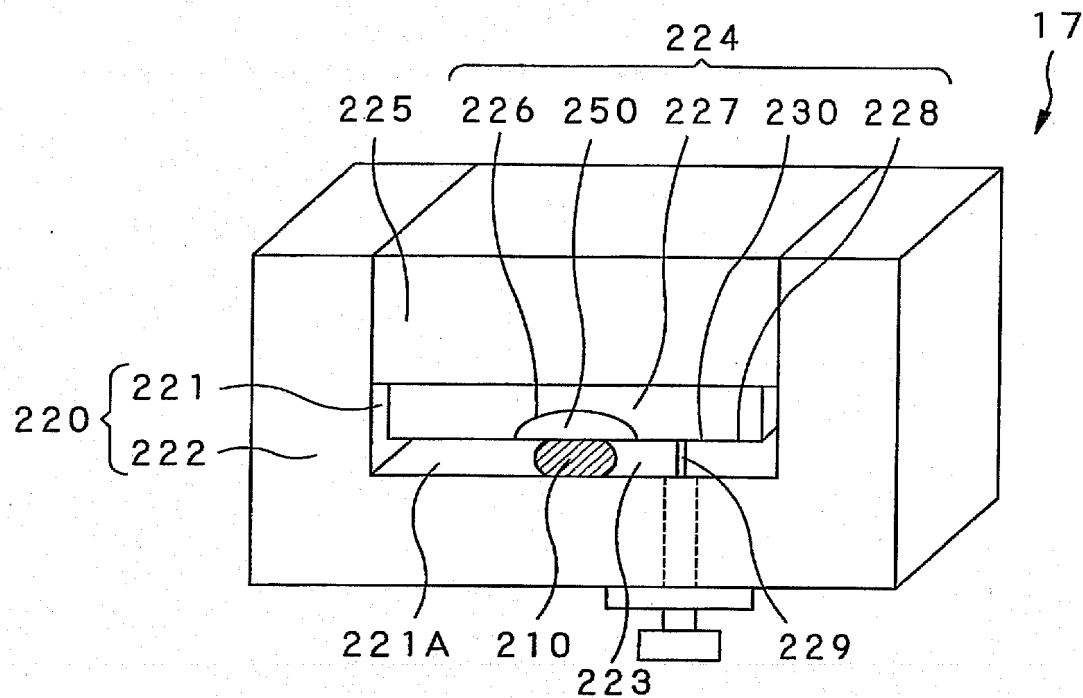


Fig. 20B

Fig. 20A

17/27



F i g . 2 1

18/27

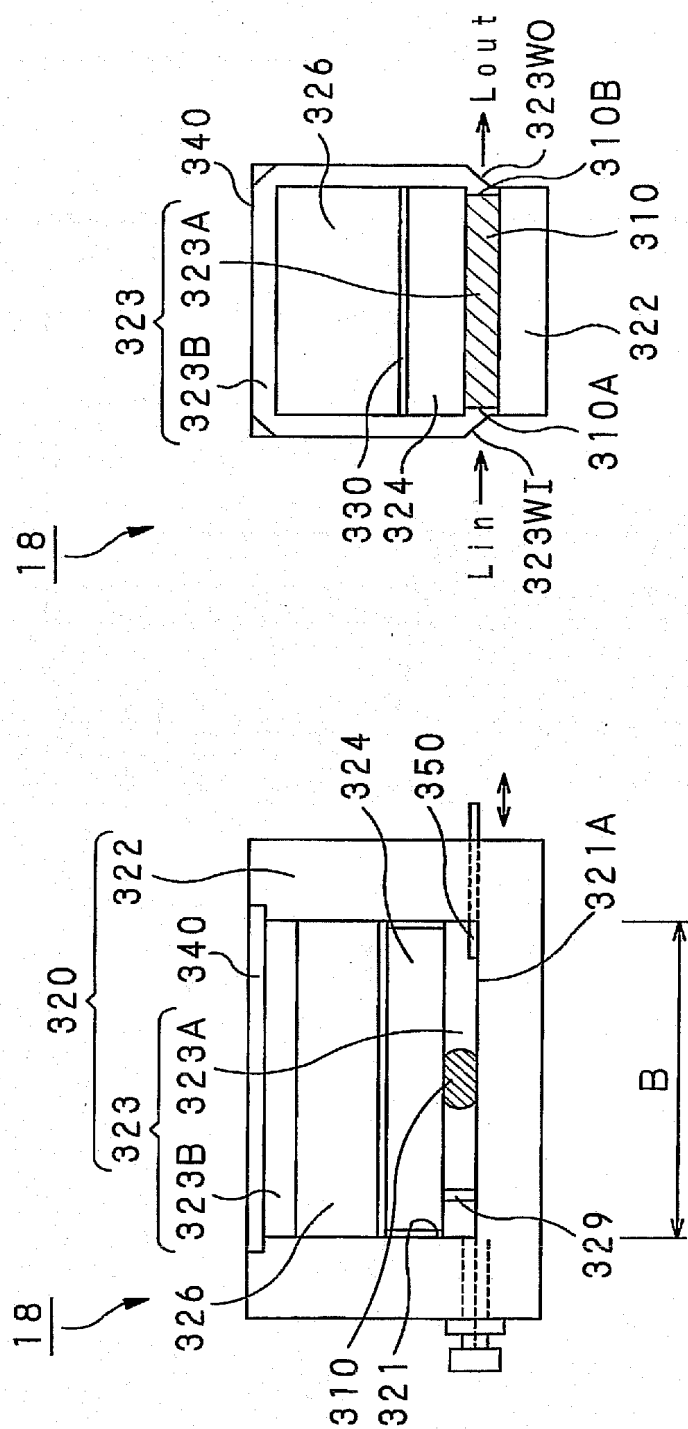
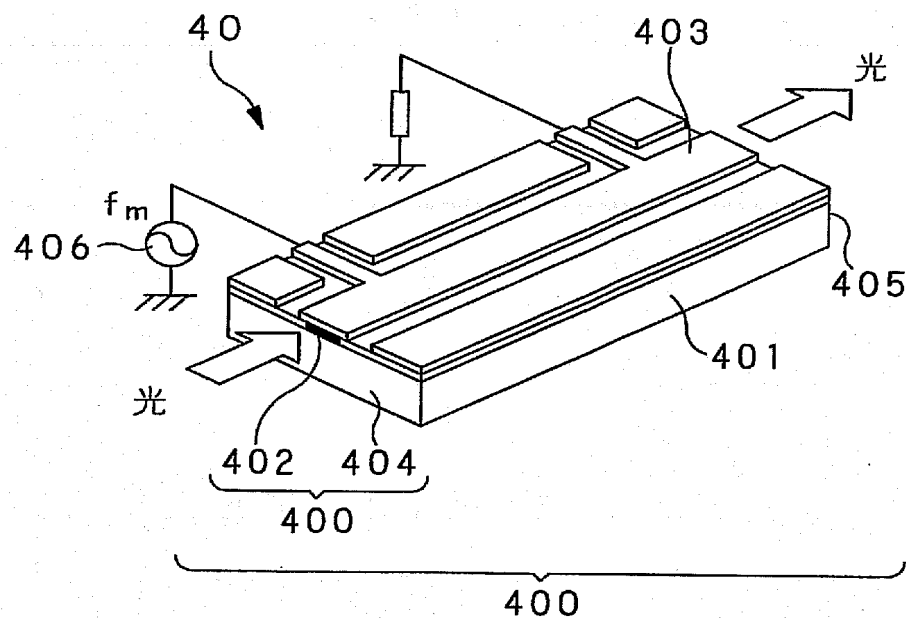


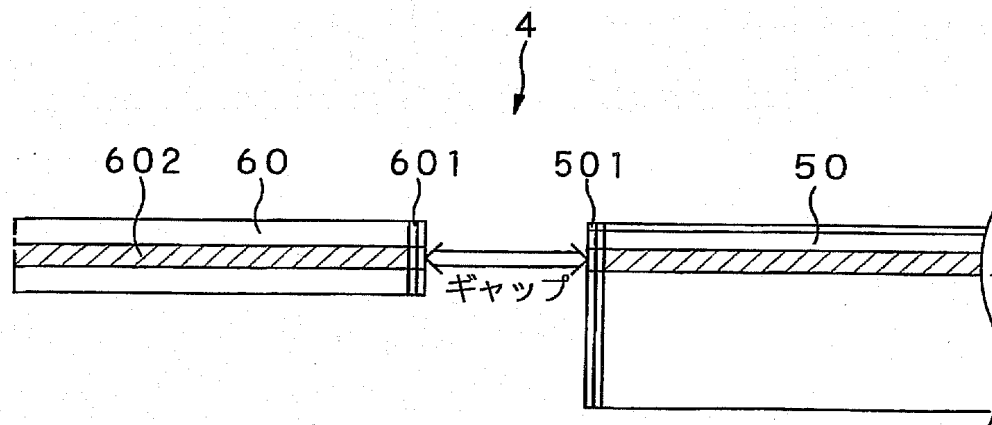
Fig. 22A

Fig. 22B

19/27

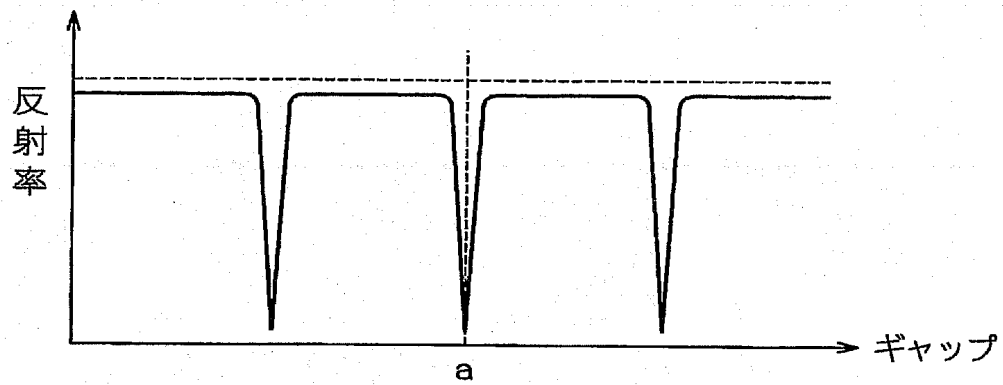


F i g . 2 3

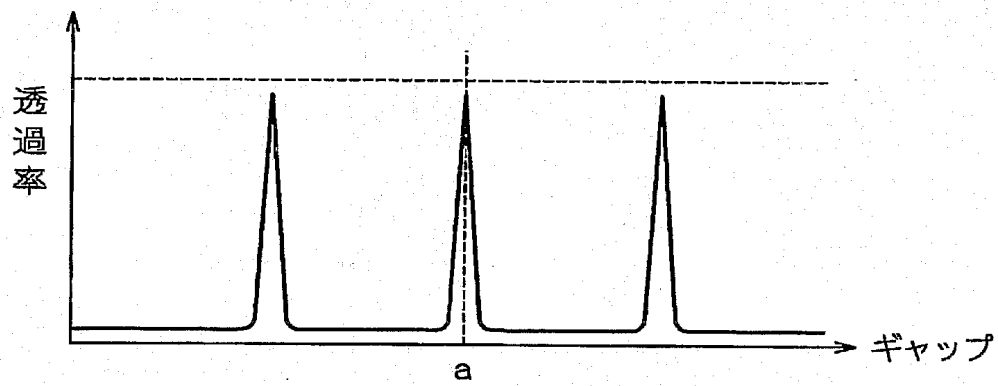


F i g . 2 4

20/27

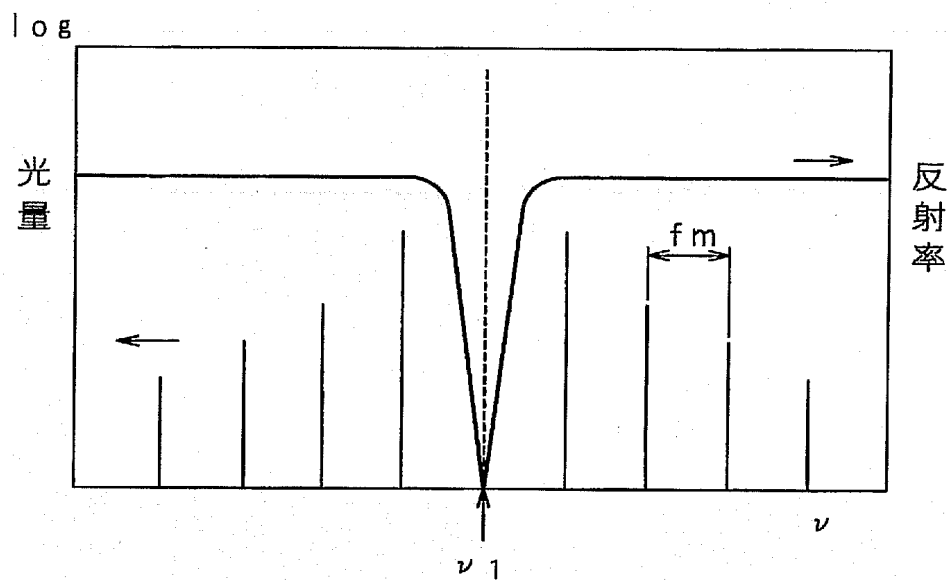


F i g . 2 5 A

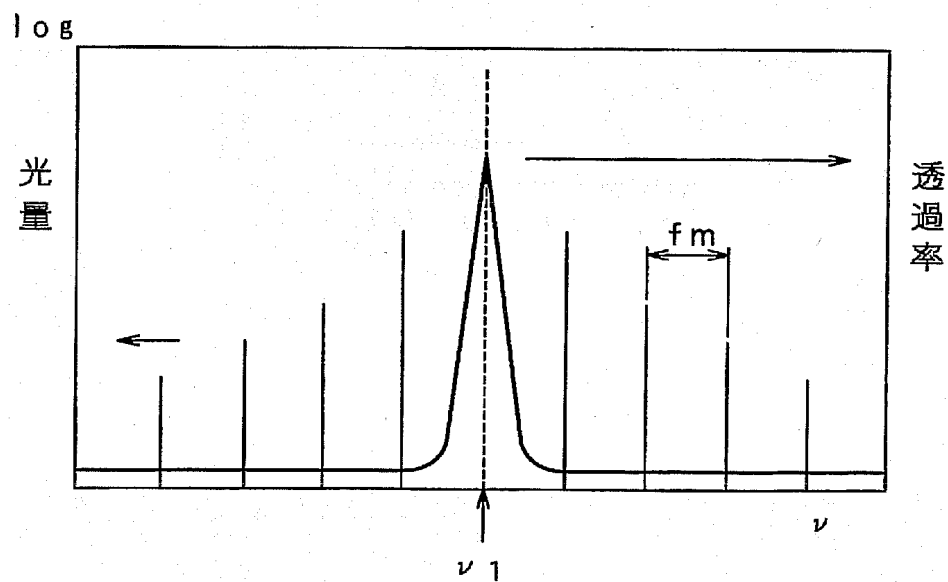


F i g . 2 5 B

21/27

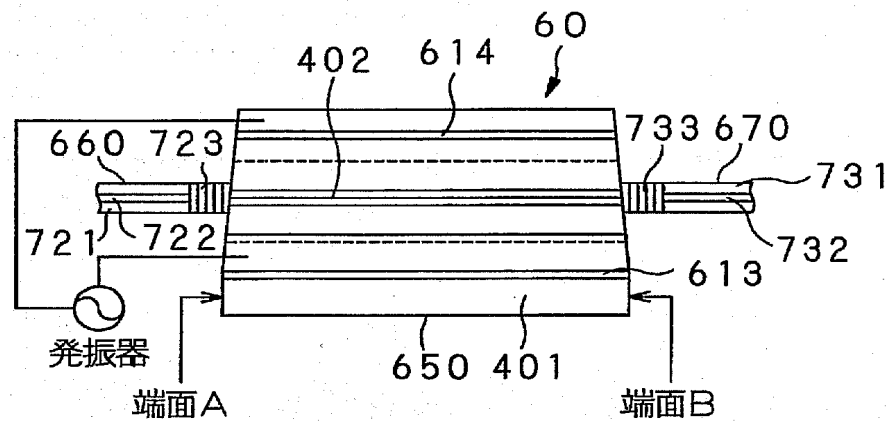


F i g . 2 6 A

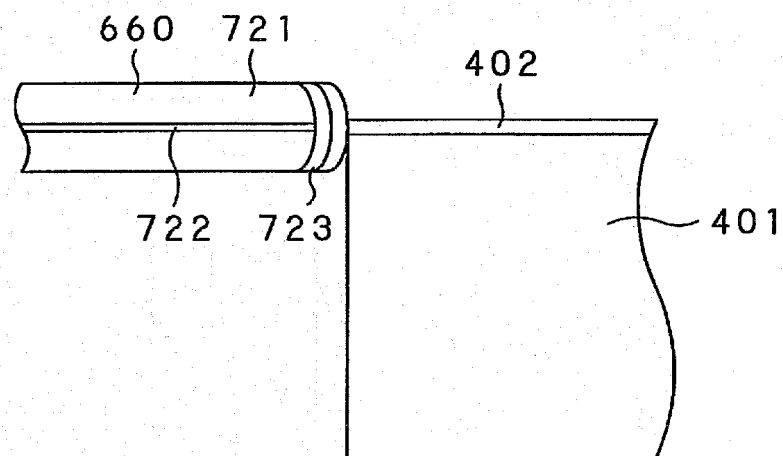


F i g . 2 6 B

22/27



F i g . 2 7



F i g . 2 8

23/27

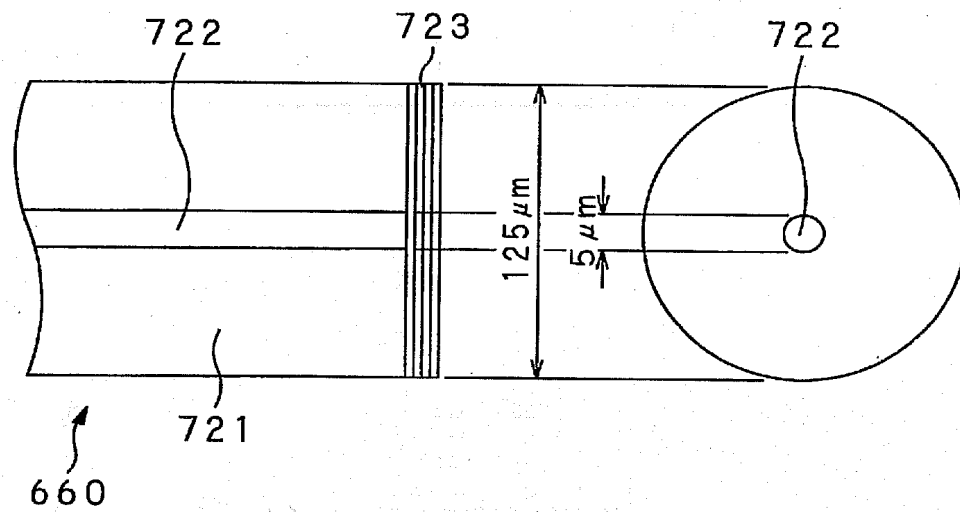


Fig. 29

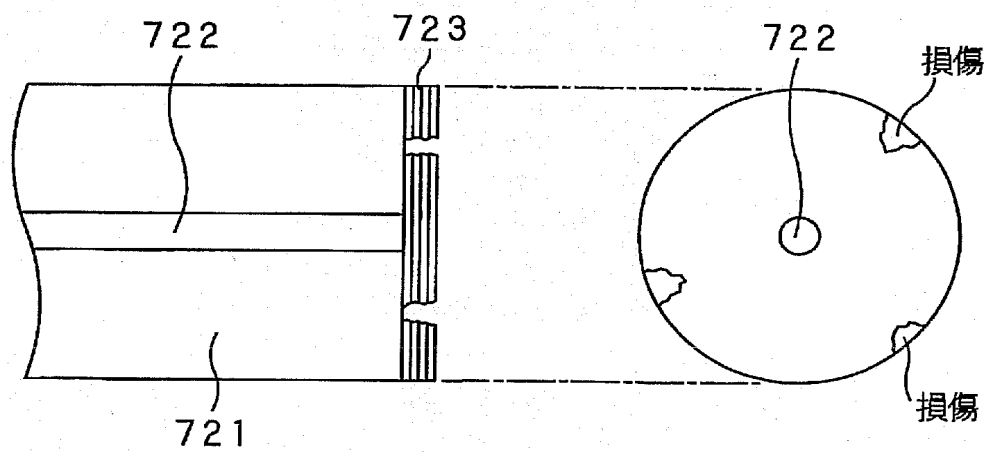


Fig. 30

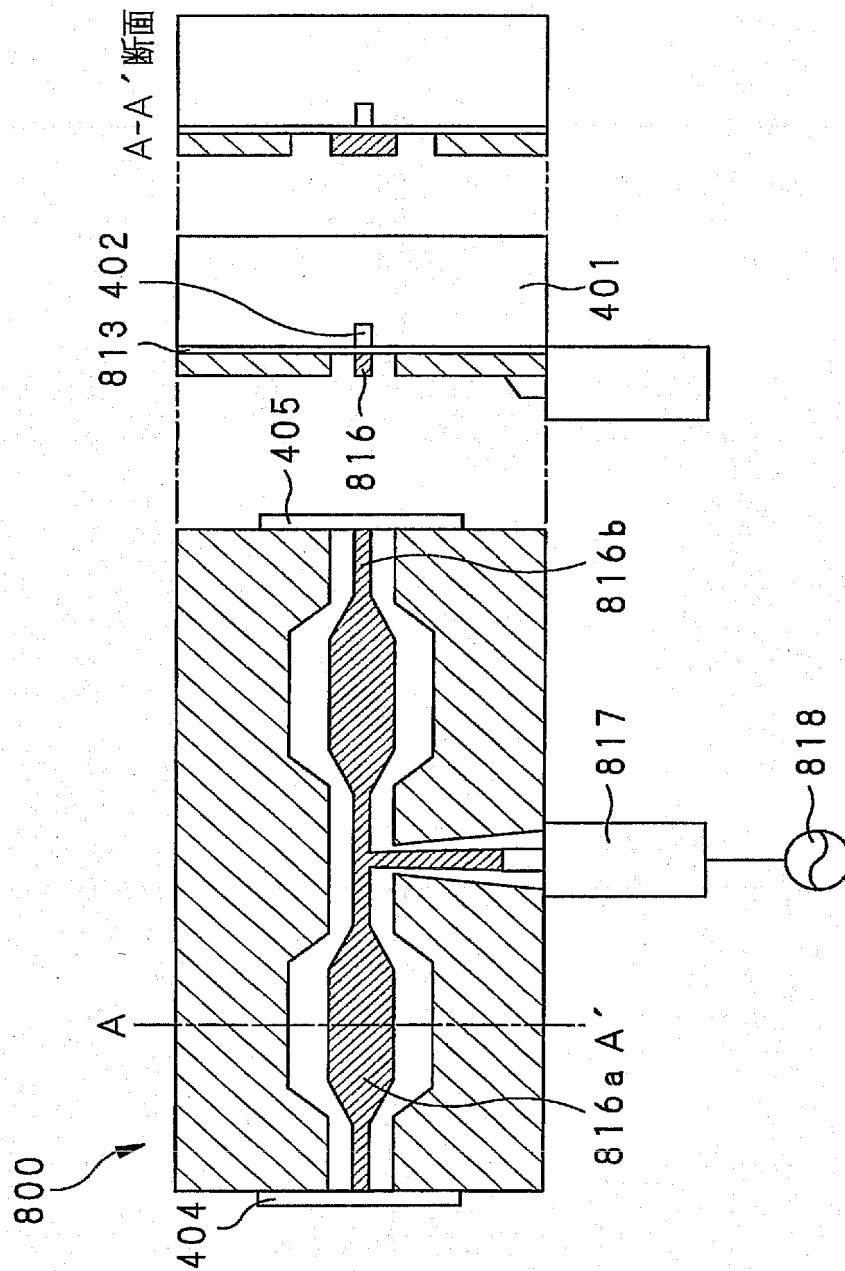


Fig. 31

Fig. 32 A

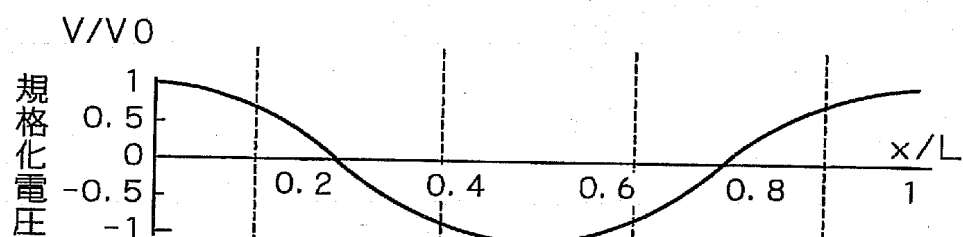


Fig. 32 B

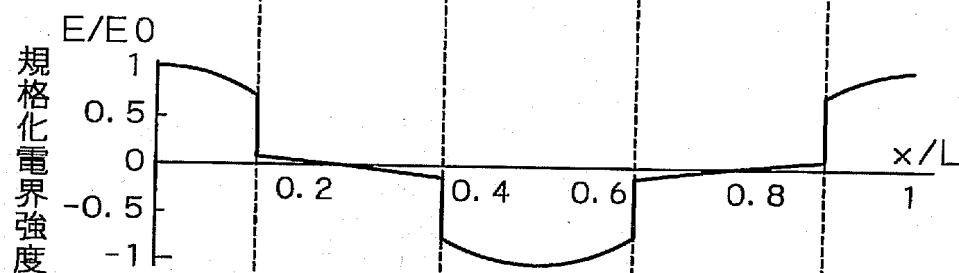


Fig. 32 C

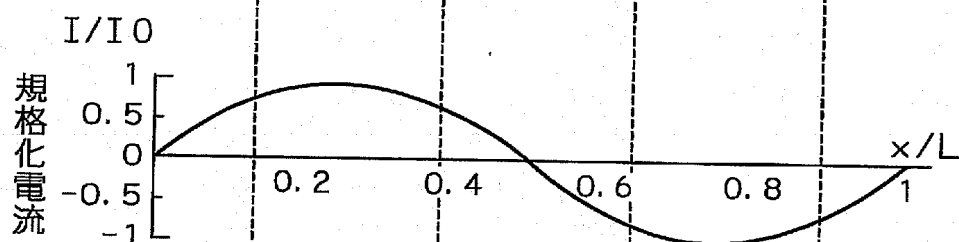
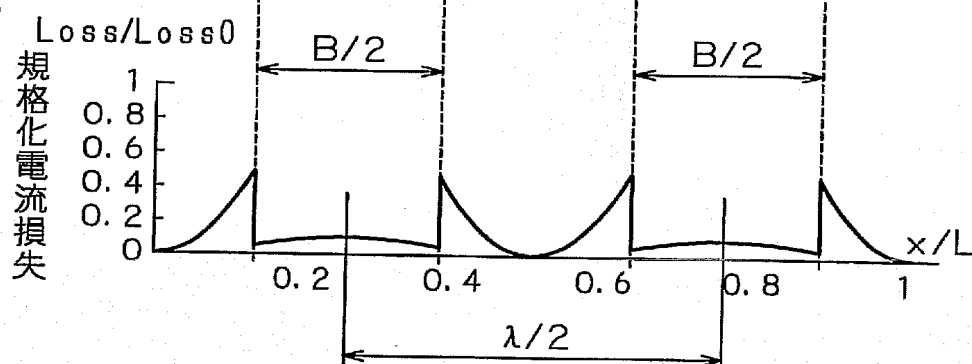
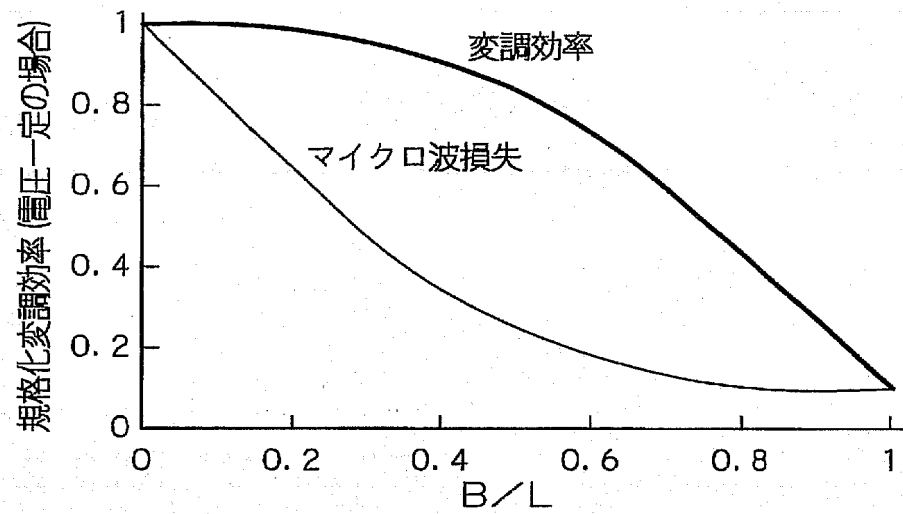


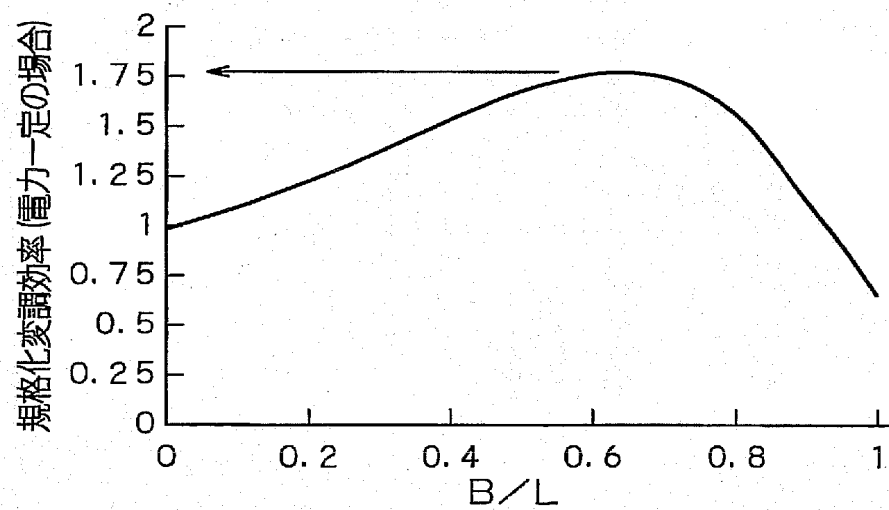
Fig. 32 D



26/27



F i g . 3 3



F i g . 3 4

27/27

Fig. 35 A

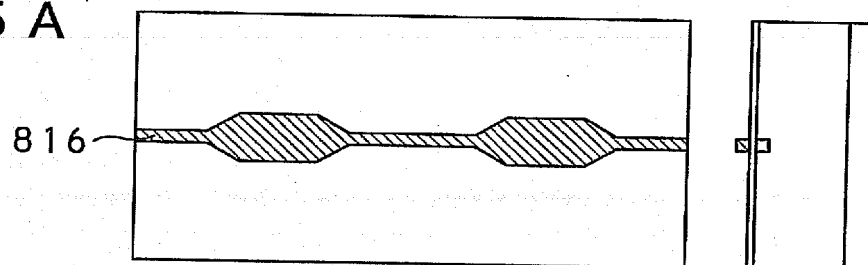


Fig. 35 B

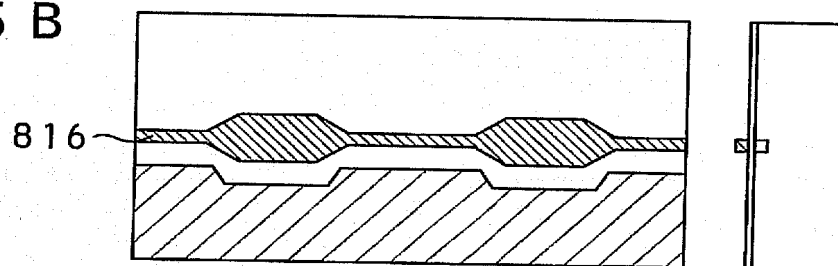


Fig. 35 C

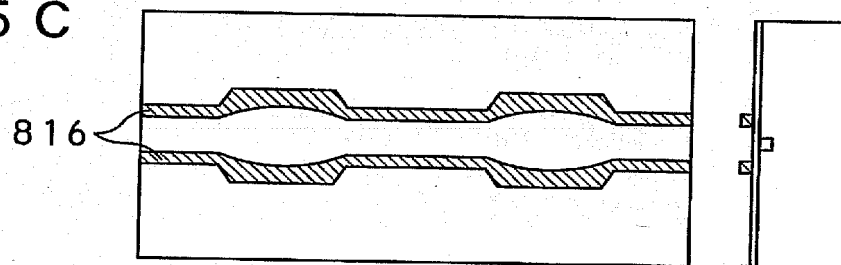
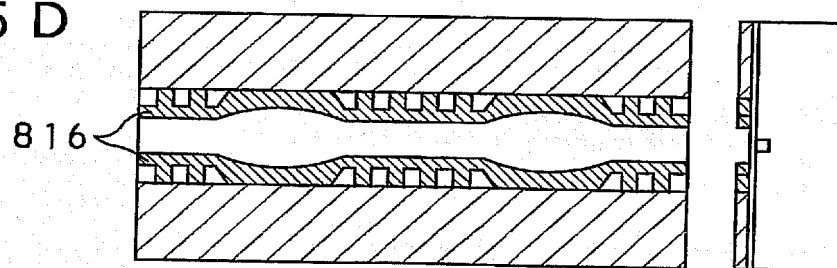


Fig. 35 D



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/07637

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl.⁷ G02F2/02

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl.⁷ G02F2/02

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2002
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2002	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST FILE (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	K. IMAI, et al., 30-THz Span Optical Frequency Comb Generation by Self-Phase Modulation in an Optical Fiber, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.34, No.1, 1998, pages 54 to 60	2 1,3-18
X A	M. KOUROGI, et al., A Coupled-Cavity Monolithic Optical Frequency Comb Generator, IEEE Photonics Technology Letters, Vol.8, No.12, 1996, pages 1698 to 1700	2 1,3-18
X A	US 6201638 B1 (University Technology Corp.), 12 March, 2001 (12.03.01), Column 7, line 47 to column 8, line 3; Fig. 4 (Family: none)	2 1,3-18



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

*

Special categories of cited documents:

"A"

document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E"

earlier document but published on or after the international filing date

"L"

document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O"

document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P"

document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T"

later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y"

document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&"

document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

26 August, 2002 (26.08.02)

Date of mailing of the international search report

10 September, 2002 (10.09.02)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/07637

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 11-288009 A (The Kanagawa Academy of Science), 19 October, 1999 (19.10.99), Full text (Family: none)	1,3-18
A	J. YE, et al., Highly selective terahertz optical frequency comb generator, Optics Letters, 1997, Vol.22, No.5, pages 301 to 303	1,3-18
A	M. KOUROGI, et al., A Monolithic Optical Frequency Comb Generator, IEEE Photonics Technology Letters, 1994, Vol.6, No.2, pages 214 to 217	1,3-18
A	Motokazu OTSU, "Kyokugen Ryoshi Sensing Gijutsu no Kaihatsu oyobi sono Riyo no tameno Kiban Gijutsu Kaihatsu", (Dai II Ki Heisei 8-9 nendo) Seika Hokokusho, 1998, pages 98 to 109	1,3-18
A	Takashi FUJII et al., "Handotai Laser no Hacho Seigyo Gijutsu no Kaihatsu (Sono 6) -Hikari Shuhasu Comb Hasseiki no Koseinoka oyobi Side Band Rock Shuhasu Anteika Laser no Shisaku-", Denryoku Chuo Kenkyusho Hokoku, 1995, pages 1 to 22	1,3-18
A	JP 10-206919 A (Nippon Hoso Kyokai), 07 August, 1998 (07.08.98), Full text (Family: none)	7

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02F 2/02

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G02F 2/02

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICSTファイル (JOIS)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X A	K. IMAI, et. al., 30-THz Span Optical Frequency Comb Generation by Self-Phase Modulation in an Optical Fiber, IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 34, No. 1, 1998, pp. 54-60	2 1, 3-18
X A	M. KOUROGI, et. al., A Coupled-Cavity Monolithic Optical Frequency Comb Generator, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 8, No. 12, 1996, pp. 1698-1700	2 1, 3-18

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

26.08.02

国際調査報告の発送日

10.09.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

三橋 健二



2X

9412

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X A	US 6201638 B1 (Univercity Technology Corporation) 2001. 03. 12, 第7欄第47行-第8欄第3行, Fig. 4 (ファミリーなし)	2 1, 3-18
A	JP 11-288009 A (財団法人神奈川科学技術アカデミ ー) 1999. 10. 19, 全文 (ファミリーなし)	1, 3-18
A	J. YE, et. al., Highly selective terahertz optical frequency comb generator, OPTICS LETTERS, 1997, Vol. 22, No. 5, pp. 301-303	1, 3-18
A	M. KUROGI, et. al., A Monolithic Optical Frequency Comb Generator, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 1994, Vol. 6, No. 2, pp. 214-217	1, 3-18
A	大津元一, 極限量子センシング技術の開発及びその利用のための基 盤技術開発 (第II期平成8-9年度) 成果報告書, 1998, pp. 98-109	1, 3-18
A	藤井隆 他, 半導体レーザーの波長制御技術の開発 (その6) - 光 周波数コム発生器の高性能化およびサイドバンドロック周波数安定 化レーザーの試作 -, 電力中央研究所報告, 1995, pp. 1- 22	1, 3-18
A	JP 10-206919 A (日本放送協会) 1998. 08. 07, 全文 (ファミリーなし)	7

